



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**EWERTON WEYNEMI CAVALCANTE DOS SANTOS**

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE UM GEOTÊXTIL TECIDO SUBMETIDO AO**  
**INTEMPERISMO DO AMBIENTE COSTEIRO EM NATAL/RN**

**NATAL/RN**

**2020**

EWERTON WEYNEMI CAVALCANTE DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE UM GEOTÊXTIL TECIDO SUBMETIDO AO  
INTEMPERISMO DO AMBIENTE COSTEIRO EM NATAL/RN

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

Coorientador: Prof. Dr. José Ivan de Medeiros.

NATAL/RN

2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

Sistema de Bibliotecas – SISBI

Catálogo de Publicação da Fonte. UFRN – Biblioteca Central Zila Mamede

SANTOS, Ewerton Weynemi Cavalcante dos.

Avaliação da degradação de um geotêxtil tecido submetido ao intemperismo do ambiente costeiro em Natal/RN / Ewerton Weynemi Cavalcante dos Santos. - 2020.

104f.: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, RN, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

Coorientador: Prof. Dr. José Ivan de Medeiros.

1. Geotêxteis - Dissertação. 2. Degradação – Dissertação. 3. Durabilidade - Dissertação. 4. Intemperismo – Dissertação. 5. Radiação UV – Dissertação. I. França, Fagner Alexandre Nunes de. II. Medeiros, José Ivan de. III. Título.

RN/UF/BCZM

677 (813.2)

CDU

EWERTON WEYNEMI CAVALCANTE DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE UM GEOTÊXTIL TECIDO SUBMETIDO AO  
INTEMPERISMO DO AMBIENTE COSTEIRO EM NATAL/RN

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França – Orientador (UFRN)

---

Prof. Dr. José Ivan de Medeiros – Co-orientador (UFRN)

---

Prof. Dr. Ênio Fernandes Amorim – Examinador Interno (IFRN)

---

Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha – Examinador Externo (UFSCAR)

**Natal, 30 de outubro de 2020.**

*À Andresa, esposa amada;  
Aos meus filhos Rafael e Rute;  
Dedico esta dissertação.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus, por tudo o que tem feito em minha vida. A Ele seja a glória para sempre.

Aos meus pais, por viverem em prol dos filhos.

A minha esposa e aos meus filhos, por entenderem a minha ausência e apoiarem este projeto.

Ao Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França, pela amizade e excelente orientação neste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Ivan de Medeiros, pela orientação e apoio.

Ao Prof. Dr. Deusimar Freire Brasil e ao Departamento de Oceanografia e Limnologia da UFRN, pela cessão do espaço e pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRN, por todo o esforço em transmitir o conhecimento.

Aos meus amigos de pós-graduação, pelo companheirismo durante o curso.

Ao meu grande amigo Eng. Wellington da Silva, pela ajuda com a exposição do material

Ao Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha, ao Eng. Matheus Cardoso dos Santos e à equipe do Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pelos ensaios de tração realizados com o geotêxtil.

Ao Engenheiro Paulo Rocha e à empresa Geo Soluções Eng. Geotécnica Ltda, pela doação do geotêxtil.

*Apega-te à instrução, não a largues; guarda-a, porque ela é a tua vida.*

Provérbios 4:13

## RESUMO

O número de casos de obras marítimas e de proteção costeira que utilizam os geossintéticos têm aumentado. Frequentemente são empregados sistemas que utilizam materiais geossintéticos em conjunto com materiais de enchimento, usualmente areia, empregados para prevenção e controle da erosão costeira. O tipo de geossintético mais utilizado nesses sistemas é o geotêxtil. O ambiente costeiro tem como principais agentes agressivos a radiação UV e a salinidade da água do mar. A durabilidade e as propriedades do material, após exposição ao intemperismo em ambientes oceânicos, precisam ser conhecidas para que sejam feitos dimensionamentos mais precisos. Nas obras hidráulicas, a resistência à tração é uma das propriedades mais importantes a serem garantidas. Este trabalho analisou a degradação de um geotêxtil tecido submetido ao intemperismo do ambiente costeiro em Natal/RN comparando valores de ensaios de tração antes e após a exposição. A exposição se deu por um período de até noventa dias. As amostras foram expostas em quatro situações e interações distintas: sobre um pórtico de madeira, sobre areia, sobre areia imersos em água do mar, e apenas imersos em água do mar. Para avaliar os efeitos da degradação, as amostras de geotêxtil foram submetidas a ensaios de tração faixa estreita, conforme ASTM D5035. A análise dos resultados consistiu no confronto dos valores de resistência à tração e de deformação no colapso obtidos das amostras virgens e das amostras expostas, considerando o meio e o tempo de exposição. Os resultados encontrados mostram que, para o período analisado, não houve degradação significativa do geotêxtil tecido de polipropileno e que as diversas situações de exposição não apresentaram grandes divergências nos resultados.

Palavras-chaves: Geotêxteis, Degradação, Durabilidade, intemperismo, radiação UV.

## **ABSTRACT**

The number of cases of maritime works and coastal protection using geosynthetics has increased. Systems that use geosynthetic materials in conjunction with filler materials, usually sand, are often used to prevent and control coastal erosion. The type of geosynthetic most used in these systems is geotextile. The coastal environment has as main aggressive agents UV radiation and salinity of sea water. The durability and properties of the material, after exposure to weathering in oceanic environments, need to be known for more accurate designing. In hydraulic works, tensile strength is one of the most important properties to be guaranteed. This research analyzed the degradation of a woven geotextile submitted to the weathering of the coastal environment in Natal / RN comparing values of tensile tests before and after exposure. The samples were exposure for a period of up to three months. The samples were exposed in four different situations and interactions: on a wooden plate, on sand, on sand immersed in sea water, and only immersed in sea water. In order to assess the effects of degradation, the geotextile samples were subjected to breaking force and elongation of textile fabrics test, according to ASTM D5035. The analysis of the results consisted of comparing the values of tensile strength and deformation at break obtained from the virgin samples and the exposed samples, considering the mean value and the time of exposure. The results found show that, for the analyzed period, there was no significant degradation of the polypropylene woven geotextile and that the different exposure situations did not present great divergences in the results.

**Keywords:** Geotextiles, Degradation, Durability, weathering, UV radiation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estrutura química dos cinco homopolímeros mais produzidos no Brasil...	23
Figura 2 –	Estrutura química das unidades repetitivas de diversos copolímeros.....	24
Figura 3 –	Alguns exemplos de geossintéticos.....	30
Figura 4 –	Principais funções dos geossintéticos.....	32
Figura 5 –	Curvas tração-deformação de geotêxteis tecidos e não tecidos.....	39
Figura 6 –	Exemplo das fases da fluência de um geotêxtil tecido de polipropileno submetido a uma sollicitação de tração igual a 67% de sua resistência, no sentido transversal de fabricação.....	40
Figura 7 –	Estrutura típica dos geotêxteis tecidos.....	44
Figura 8 –	Diferenças entre geotêxteis tecidos e não tecidos.....	45
Figura 9 –	Geotêxtil tricotado.....	46
Figura 10 –	Funções desempenhadas pelos geotêxteis.....	47
Figura 11 –	Etapas envolvidas na termo-oxidação do polipropileno.....	51
Figura 12 –	Extração dos aditivos por lixiviação e por volatilização.....	54
Figura 13 –	Corpos de prova para ensaios de massa por unidade de área.....	66
Figura 14 –	Ensaio de Tração.....	68
Figura 15 –	Local de Exposição (Mapa).....	69
Figura 16 –	Local de Exposição (Foto).....	70
Figura 17 –	Exposição ao ar livre sobre pórtico de madeira.....	70
Figura 18 –	Exposição ao ar livre sobre areia.....	71
Figura 19 –	Exposição sobre areia e imersos em água do mar.....	71
Figura 20 –	Exposição de corpos de prova imersos em água do mar.....	72
Figura 21 –	Medição da temperatura na superfície do geotêxtil exposto em campo.....	74
Figura 22 –	IC para o parâmetro de resistência à tração (kN/m).....	82
Figura 23 –	IC para o parâmetro de deformação no colapso (%).....	84

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Resistência à Tração – Sentido Transversal.....	77
Gráfico 2 –	Resistência à Tração – Sentido Longitudinal.....	78
Gráfico 3 –	Amplitude térmica no ambiente x Amplitude térmica das amostras.....	79
Gráfico 4 –	Temperatura média diária e radiação máxima diária acumulada.....	80
Gráfico 5 –	Umidade relativa do ar e precipitação.....	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Polímeros mais utilizados na fabricação dos geossintéticos e suas aplicações.....	25
Quadro 2 –	Comparação das propriedades dos polímeros base.....	26
Quadro 3 –	Descrição de alguns tipos de aditivos.....	28
Quadro 4 –	Classificação dos Geossintéticos.....	31
Quadro 5 –	Funções que os Geossintéticos podem desempenhar.....	32
Quadro 6 –	Funções dos vários geossintéticos em projetos de engenharia.....	34
Quadro 7 –	Exemplos de aplicação de geossintéticos.....	35
Quadro 8 –	Exemplos de tempos de vida útil de acordo com a aplicação do geossintético.....	48
Quadro 9 –	Características técnicas do Geotêxtil Tecido: StrataTex W5050®.....	65
Quadro 10 –	Análise da água do mar coletada na Via Costeira de Natal/RN.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Porcentagem em peso da composição dos polímeros comumente usados na fabricação de geossintéticos.....	29
Tabela 2 –	Tabela simplificada dos valores t de <i>Student</i> .....	63
Tabela 3 –	Identificação dos grupos e subgrupos de amostras.....	73
Tabela 4 –	Caracterização física do geotêxtil.....	74
Tabela 5 –	Resultados estatísticos de resistência à tração das amostras virgens no sentido transversal.....	75
Tabela 6 –	Resultados estatísticos de deformação no colapso das amostras virgens no sentido transversal.....	76
Tabela 7 –	Resultados estatísticos de resistência à tração das amostras virgens no sentido longitudinal.....	76
Tabela 8 –	Resultados estatísticos de deformação no colapso das amostras virgens no sentido longitudinal.....	76
Tabela 9 –	Principais dados climáticos obtidos durante os períodos de exposição.....	78
Tabela 10 –	Resultados de resistência à tração das amostras virgens no sentido transversal.....	82
Tabela 11 –	Resultados de deformação das amostras virgens no sentido transversal.....	83

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CPE	Polietileno Clorado
CV	Coefficiente de Variação
EPDM	Etileno-Propileno Monômero Diênico
EPS	Poliestireno Expandido
IC	Intervalo de Confiança
IGS	International Geosynthetics Society
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PPTA	Poliaramida
PS	Poliestireno
PVA	Polivinil Alcól
PVC	Polivinil Clorado
NBR	Norma Brasileira Registrada
RN	Rio Grande do Norte
UFRN	Univerddade Federal do Rio Grande do Norte
UV	Radiação ultravioleta

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{x}$	Média amostral
$\mu$	Média da população
$c$	Nível de confiança
$\alpha$	Nível de significância
$\sigma$	Desvio-padrão da população
$n$	Tamanho da amostra
$s$	Desvio- Padrão amostral
$t$	Distribuição <i>t de Student</i>
®	Marca registrada
$\mu A$	Massa por unidade de área

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos.....	19
<b>1.3</b>	<b>Organização do Trabalho.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Geossintéticos.....</b>	<b>21</b>
2.1.1	Introdução.....	21
2.1.2	Definições.....	21
2.1.3	Constituição.....	22
2.1.3.1	Polímeros.....	22
2.1.3.1	Aditivos.....	26
2.1.4	Classificação dos geossintéticos.....	30
2.1.5	Funções dos geossintéticos.....	31
2.1.6	Aplicações dos geossintéticos.....	34
2.1.7	Propriedades dos geossintéticos.....	36
2.1.7.1	Propriedades físicas.....	37
2.1.7.2	Propriedades mecânicas.....	38
2.1.7.3	Propriedades hidráulicas.....	41
2.1.7.4	Propriedades de durabilidade.....	42
<b>2.2</b>	<b>Geotêxteis.....</b>	<b>43</b>
2.2.1	Classificação.....	43
2.2.2	Funções dos geotêxteis.....	46
2.2.3	Propriedades dos geotêxteis.....	47
2.2.3.1	Propriedades físicas.....	47
2.2.3.2	Propriedades hidráulicas.....	47
2.2.3.3	Propriedades mecânicas.....	47
<b>2.3</b>	<b>Durabilidade dos geossintéticos.....</b>	<b>48</b>
2.3.1	Agentes de degradação dos geossintéticos.....	49
2.3.1.1	Temperatura.....	50

2.3.1.2	Termo-oxidação.....	51
2.3.1.3	Foto-oxidação.....	52
2.3.1.4	Ação de líquidos.....	54
2.3.1.5	Degradação química.....	55
2.3.1.6	Umidade.....	55
2.3.1.7	Agentes biológicos.....	55
2.3.1.8	Outros agentes de degradação.....	56
2.3.1.9	Degradação por agentes combinados.....	56
2.3.1.10	Degradação em ambientes costeiros.....	56
<b>2.4</b>	<b>Estudos sobre a durabilidade de geotêxteis expostos à radiação UV.....</b>	<b>57</b>
<b>2.5</b>	<b>Tratamento estatístico.....</b>	<b>61</b>
2.5.1	Intervalo de confiança.....	62
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1</b>	<b>Material estudado.....</b>	<b>65</b>
3.1.1	Amostras e corpos de prova.....	66
3.1.1.1	Corpos de prova para ensaios de massa por unidade de área.....	66
3.1.1.2	Corpos de prova para ensaio de tração nominal.....	67
3.1.1.3	Corpos de prova para exposição em campo.....	67
3.1.2	Ensaio de caracterização física e mecânica.....	67
3.1.2.1	Massa por unidade de área.....	67
3.1.2.2	Resistência nominal à tração.....	68
3.1.3	Exposição em campo.....	69
3.1.3.1	Exposição ao ar livre em pórtico de madeira.....	70
3.1.3.2	Exposição ao ar livre sobre areia.....	71
3.1.3.3	Exposição sobre areia e imersos em água do mar.....	71
3.1.3.4	Exposição de corpos de prova imersos em água do mar.....	72
<b>3.2</b>	<b>Ensaio para avaliação da degradação.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3</b>	<b>Análise dos resultados.....</b>	<b>74</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do geotêxtil.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2</b>	<b>Exposição em Campo.....</b>	<b>78</b>
4.2.1	Resultados dos ensaios de tração pós-exposição em campo.....	81

<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>85</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>85</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO GEOTÊXTIL VIRGEM....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS PÓS EXPOSIÇÃO EM</b>	
	<b>CAMPO.....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Geossintéticos são produtos nos quais ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob forma de manta, tira ou estrutura tridimensional e são utilizados em contato com o solo ou outros materiais (ABNT NBR ISO 10318-1, 2018). Esses produtos podem ser utilizados em uma grande variedade de problemas geotécnicos, tais como reforço, estabilização de solos, drenagem e filtração, barreiras para fluidos e gases, controle de erosão, barreira de sedimentos, proteção ambiental etc. (PALMEIRA, 2018).

Os geossintéticos são produzidos utilizando-se materiais poliméricos sintéticos, especialmente desenvolvidos para serem utilizados em aplicações de engenharia geotécnica, ambiental, hidráulica e de transporte. Todavia, nenhum produto geossintético é feito totalmente de resina polimérica. A resina polimérica primária é misturada ou formulada com aditivos para uma variedade de finalidades. A quantidade total de cada aditivo em uma dada formulação varia amplamente. Os aditivos podem melhorar ou modificar aspectos do comportamento do polímero básico como proteção contra radiação ultravioleta, como antioxidantes ou estabilizadores térmicos (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012).

A utilização de geossintéticos tem aumentado em obras de engenharia, devido à variedade de produtos e as possibilidades de aplicações. Em muitos casos, têm demonstrado serem soluções mais eficazes, em relação a soluções mais tradicionais, considerando os custos, o tempo de execução e o equipamento necessário (DAS NEVES, 2003).

A maior limitação no uso de geossintéticos está relacionada à sua durabilidade. Essa durabilidade pode ser entendida como sua capacidade de manter propriedades funcionais que atendem aos requisitos da aplicação durante a vida útil exigida pelo projeto (GUIMARÃES et al., 2017). A capacidade de um material para resistir de forma conveniente à severidade do ambiente em que é colocado é um fator essencial, no que diz respeito à vida do projeto e aos custos iniciais e de manutenção (DAS NEVES, 2003). Assim, é importante avaliar a resistência dos materiais aos vários agentes de degradação. Os trabalhos que avaliam a durabilidade dos geossintéticos são relativamente escassos. No entanto, o número de estudos nesta área tem aumentado significativamente nos últimos anos (CARNEIRO, 2009).

Espera-se que o geossintético mantenha todas as propriedades especificadas para garantir os fatores de segurança do projeto durante todo o tempo de vida útil da obra. A vida útil de uma estrutura com geossintético depende, em grande parte, da durabilidade do geossintético. Os processos de degradação podem afetar a durabilidade dos geossintéticos modificando uma ou mais de suas funções (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012). Os agentes que podem contribuir para a alteração nas propriedades dos materiais de construção são diversos. Agentes de degradação são o conjunto de fatores que atuam para modificar as características do material. Na construção civil, os principais agentes de degradação são de ordem climática, como, por exemplo, temperatura, umidade relativa do ar, precipitação atmosférica, vento, pressão atmosférica e outros (PINTO, 2006).

O efeito do meio é resultado do ataque conjunto de vários elementos. Os mais importantes são a luz ultravioleta (UV) da radiação solar, temperatura, umidade, vento, poeira e poluentes. Durante o envelhecimento natural os efeitos mais considerados são radiação ultravioleta, água e temperatura (ROSA, 1996).

Os geossintéticos são constituídos basicamente por polímeros e, nesse caso, a exposição do polímero à luz direta do sol pode ser uma das principais fontes de degradação. Sabe-se que outros condicionantes ambientais afetam as taxas de degradação (HSIEH; WANG; CHIU, 2003).

Os geossintéticos podem desempenhar uma ou mais funções nas diversas obras onde são aplicados. Para exercerem corretamente suas funções, os geossintéticos devem possuir um conjunto adequado de propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. Além disso, devem apresentar uma boa resistência aos diferentes agentes de degradação, pois a degradação prematura dos materiais pode pôr em risco a estabilidade e/ou a funcionalidade da estrutura onde estão inseridos (CARNEIRO, 2009).

Considerando a importância da durabilidade na estimativa da vida de serviço de um geossintético, o presente trabalho estudou a degradação de um geotêxtil submetido ao intemperismo e às condições climáticas do ambiente costeiro em um geotêxtil tecido produzido a partir do polímero polipropileno, submetendo-o a diferentes modos de exposição à radiação UV em campo. Simultaneamente, amostras foram expostas a condições climáticas reais sobre uma mesa com tampo em madeira, outras repousando sobre solo arenoso, outras repousando sobre solo arenoso e imersas em água do mar e, ainda, amostras simplesmente imersas em água do mar.

A degradação estudada em um determinado lugar pode não estabelecer parâmetros para um ambiente diferente, ou seja, torna-se importante a avaliação do desgaste promovido em diferentes localidades e condições climáticas. Analisando estes aspectos, este trabalho estudou a degradação de um geotêxtil submetido ao intemperismo do ambiente costeiro para as condições climáticas de Natal/RN.

## **1.1 Justificativa**

A durabilidade dos geossintéticos pode ser definida como a capacidade que os materiais possuem de manter determinadas propriedades ao longo do tempo. Para tentar assegurar a funcionalidade dos geossintéticos durante todo o tempo de aplicação em uma obra, é necessário identificar os principais agentes de degradação presentes e avaliar qual a resistência dos materiais a esses agentes. A garantia da durabilidade é um requisito fundamental para a aplicação dos geossintéticos (CARNEIRO 2009).

Em ambientes costeiros os geossintéticos podem estar em contato com vários agentes de degradação, como luz solar, água do mar e oxigênio. Esses agentes podem degradar os geossintéticos, afetando o seu desempenho e reduzindo o seu tempo de vida útil. Para o bom funcionamento das estruturas onde estão inseridos, é importante que os geossintéticos possuam uma boa resistência à degradação. Assim, torna-se relevante compreender a forma como esses ataques afetam as propriedades do material estudado nas situações e interações as quais ele é submetido (CARNEIRO; MORAIS; LOPES, 2016).

## **1.2 Objetivos**

A seguir são relacionados os objetivos Geral e específicos do presente trabalho.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da degradação de um geotêxtil tecido de polipropileno tecido exposto em campo a alguns agentes degradadores presentes em ambientes costeiros, avaliando os resultados das interações entre eles. Foram avaliadas as propriedades de massa por unidade de área e de resistência à tração.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Estudo da degradação de um geotêxtil tecido exposto ao envelhecimento por radiação UV, ao ar livre, sobre uma mesa com tampo em madeira;
- Estudo da degradação de um geotêxtil exposto ao envelhecimento por radiação UV, ao ar livre, repousando sobre solo arenoso;
- Estudo da degradação de um geotêxtil exposto ao envelhecimento por radiação UV de amostras repousando sobre solo arenoso e imersas em água do mar em recipiente aberto.
- Estudo da degradação de um geotêxtil exposto ao envelhecimento por radiação UV de amostras imersas em água do mar, em recipiente aberto.

### 1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em 5 (cinco) capítulos, um tópico para referências bibliográficas e 2 Apêndices.

O Capítulo 1 traz a introdução ao tema abordado, expõe de forma sucinta o que foi realizado ao longo do estudo e expõe a importância da pesquisa sobre durabilidade de geossintéticos, além de apresentar a justificativa e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a pesquisa de outros trabalhos que trataram de assuntos relacionados com o tema proposto. Apresenta-se definições, histórico, materiais constituintes (polímeros e aditivos), classificação, funções, aplicações e propriedades, dos geossintéticos de forma geral, e dos geotêxteis em particular. É apresentado um estudo sobre a durabilidade dos geossintéticos, tratando de agentes e tipos de degradação. A degradação em ambientes costeiros é abordada em particular por ser este o ambiente onde foi desenvolvido o estudo. Por fim, este capítulo aborda o embasamento estatístico para avaliação de degradação do geotêxtil estudado.

O Capítulo 3 aborda a descrição do material estudado e a metodologia utilizada para preparação das amostras e corpos de prova. Aborda, ainda, a metodologia adotada para execução dos ensaios de campo e ensaios laboratoriais.

No Capítulo 4, são expostos e discutidos os resultados obtidos durante a pesquisa.

O Capítulo 5 contém as conclusões e os comentários finais acerca do trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras.

No Apêndice A, são apresentadas as tabelas com os dados e resultados da caracterização dos geotêxteis.

No Apêndice B, são apresentadas as tabelas com os dados e resultados da degradação do geotêxtil por exposição em campo.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Geossintéticos**

#### **2.1.1 Introdução**

O uso de geossintéticos em obras de engenharia civil data da década de 1950. Desde então, essa prática vem se difundindo no âmbito da geotecnia. Isto se deve às diversas vantagens que estes materiais oferecem, como versatilidade, fácil emprego, excelente desempenho e, principalmente, o baixo custo em comparação às soluções convencionais (COSTA, 1999).

Estes materiais estão sendo amplamente utilizados em substituição aos mais tradicionais e são uma excelente solução para diversas obras de infraestruturas como aterros sanitários, estradas, ferrovias, túneis, estruturas de contenção, reservatórios e estruturas de engenharia costeira (CARNEIRO; MORAIS; DE LURDES LOPES, 2018).

Os geossintéticos melhoram a estabilidade e a integridade das estruturas a longo prazo e têm as vantagens ecológicas e econômicas de exigir menos transporte e menos manejo dos recursos naturais. Existe uma grande variedade de materiais e produtos e o número de usos diferentes para eles está crescendo continuamente (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012).

#### **2.1.2 Definições**

Os geossintéticos podem ser definidos como produtos poliméricos, sintéticos ou naturais, industrializados e desenvolvidos para aplicação em obras de Engenharia Civil. O termo geossintético é uma denominação genérica que agrupa uma grande família de produtos poliméricos, dentre os quais estão os geotêxteis, as geomembranas, as geogrelhas, as geomantas e as georredes (COSTA et al., 2008). Porém, nenhum produto geossintético é constituído integralmente por polímeros. A resina polimérica é misturada ou formulada com aditivos. A quantidade total de cada aditivo em uma dada formulação varia muito (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012).

Polímeros são materiais que apresentam em sua estrutura molecular unidades relativamente simples que se repetem, ligadas entre si por ligações covalentes do tipo  $sp^3$  ( $^{13}\text{C}-^{12}\text{C}$ ;  $^{13}\text{C}-^{13}\text{C}$ ;  $^{14}\text{C}-^{12}\text{C}$ , ...). Este tipo de ligação proporciona ao produto uma grande estabilidade físico-química, formando longas cadeias e, portanto, resultando em compostos de alta massa molecular (SILVA e SILVA, 2003).

Além da resina básica, os geossintéticos contêm aditivos que possuem a função de introduzir melhorias nos processos de fabricação ou modificar aspectos do comportamento do polímero básico. Os aditivos são utilizados como melhoradores das propriedades dos produtos constituídos, reduzindo, entre outras, a intensidade dos fenômenos de degradação (PINTO, 2006). A longa expectativa de vida útil dos polímeros deve-se, sobretudo, ao desenvolvimento de aditivos estabilizadores que impedem ou retardam a degradação e prolongam a vida útil do polímero em dez ou cem vezes (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012).

### 2.1.3 Constituição

A composição dos geossintéticos inclui, normalmente, o polímero de base (por exemplo, poliolefinas ou poliésteres) e os aditivos químicos (por exemplo, estabilizantes UV ou antioxidantes). Os aditivos são normalmente adicionados para melhorar as propriedades e/ou o desempenho dos materiais (CARNEIRO, 2009).

No geral, os geossintéticos são fabricados a partir de polímeros sintéticos, derivados do petróleo, embora algumas fibras naturais, como as de juta, sisal e coco, também sejam empregadas na fabricação de alguns geotêxteis (chamados, então, de biotêxteis) e geomantas (chamadas, então, de biomantas) (VERTEMATTI, 2015).

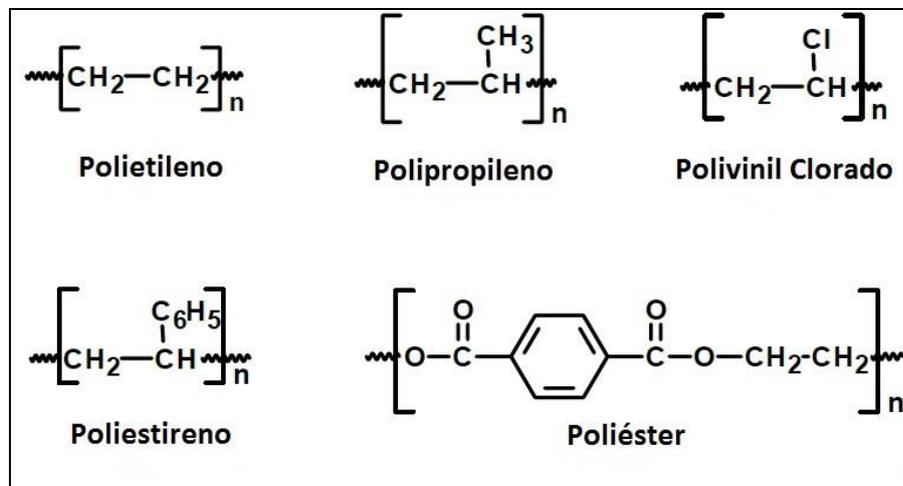
#### 2.1.3.1. Polímeros

Os polímeros são materiais orgânicos ou inorgânicos, naturais ou sintéticos, constituídos essencialmente por macromoléculas formadas por unidades que se repetem de dezenas a milhares de vezes, ao longo de uma sequência em cadeia (LODI, 2003). A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção

de um polímero é o monômero, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição (CANEVAROLO JR, 2002).

Os polímeros podem ser inicialmente classificados em homopolímeros e copolímeros. Homopolímeros são provenientes de uma única unidade repetitiva monomérica (Figura 1). Os homopolímeros podem ser lineares ou ramificados. Por exemplo, no caso do polietileno, o de baixa densidade apresenta um alto teor de ramificações, o linear de baixa densidade tem um número menor de ramificações e o de alta densidade é praticamente linear (DE PAOLI, 2008).

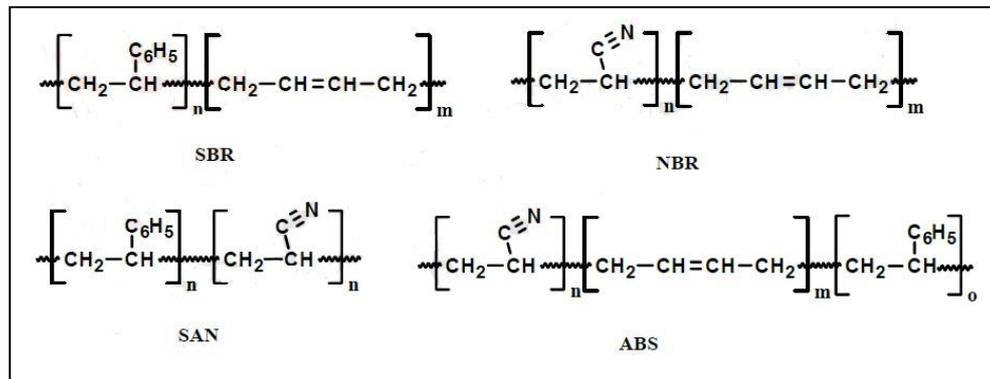
Figura 1 – Estrutura química dos cinco homopolímeros mais produzidos no Brasil.



Fonte: DE PAOLI (2008, p. 3).

Os copolímeros, por sua vez, possuem duas ou mais unidades repetitivas monoméricas diferentes, ou seja, são obtidos usando dois ou mais co-monômeros. Podem ocorrer em bloco, alternados, de forma aleatória, por enxertia (*grafting*) ou do tipo *core-shell*. Na Figura 2 são mostrados alguns exemplos de copolímeros usados com frequência pela indústria de transformação: *poli* (estireno-co-butadieno), SBR, *poli* (acrilonitrila-co-butadieno), NBR, *poli* (estireno-co-acrilonitrila), SAN, e *poli* (acrilonitrila-co-butadieno-co-estireno), ABS (DE PAOLI, 2008).

Figura 2 – Estrutura química das unidades repetitivas de diversos copolímeros.



Fonte: DE PAOLI (2008, p. 4).

De acordo com sua origem o polímero pode ser classificado como natural ou sintético. Um outro tipo de classificação muito utilizado pelas indústrias é a que se baseia na solubilidade e/ou fusibilidade do polímero, propriedades muito importantes do ponto de vista tecnológico (SILVA e SILVA, 2003). Os polímeros que podem ser fundidos sob aquecimento e solidificado por resfriamento, sem que ocorra decomposição generalizada, são chamados termoplásticos. O outro grupo desse tipo de classificação é o dos termorrígidos, polímeros infusíveis e insolúveis (SILVA e SILVA, 2003). Os termoplásticos são os materiais mais utilizados na fabricação dos geossintéticos. As propriedades principais de um termoplástico dependem da sua estrutura, dos aditivos usados e do processo pelo qual é formado (LOPES e DE LURDES LOPES, 2010).

Os geossintéticos são fabricados a partir de vários tipos de polímeros, cada um com características diferentes que influenciarão no desempenho dos produtos (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012). Os principais polímeros utilizados na fabricação dos geossintéticos estão relacionados no Quadro 1.

Quadro 1 – Polímeros mais utilizados na fabricação dos geossintéticos e suas aplicações.

Polímero	Sigla	Aplicações
Poliétileno	PE	Geotêxteis, barreiras geossintéticas, geogrelhas, tubos drenos geossintéticos, georredes e geocompostos.
Poliestireno Expandido	EPS	Geoexpandidos.
Polipropileno	PP	Geotêxteis, barreiras geossintéticas, geogrelhas e geocompostos.
Polivinil Clorado	PVC	Barreiras geossintéticas, tubos drenos geossintéticos e geocompostos.
Poliéster	PET	Geotêxteis e geogrelhas.
Poliestireno	PS	Geocompostos e geoexpandidos
Poliamida	PA	Geotêxteis, geogrelhas e geocompostos.
Etileno-Propileno Monômero Diênico	EPDM	Barreiras geossintéticas e geocompostos.
Polivinil Alcól	PVA	Geotêxteis, geogrelhas e geocompostos.
Poliétileno Clorado	CPE	Barreiras geossintéticas e geocompostos.
Poliaramida	PPTA	Geotêxteis, geogrelhas e geocompostos.

Fonte: VETERMATTI (2015, p. 36).

O peso molecular é um dos aspectos estruturais fundamentais dos polímeros. Quanto maior o peso molecular de um polímero, ou seja, quanto maiores suas macromoléculas, melhores suas propriedades mecânicas. O peso molecular é a propriedade mais importante de qualquer sistema polimérico (LODI, 2003).

A estrutura macromolecular dos polímeros influencia sua durabilidade. Com relação a esse aspecto, os polímeros podem se encontrar no estado amorfo ou cristalino. Os polímeros não formam sólidos cristalinos ou amorfos, eles formam sólidos com uma fase cristalina e outra amorfa. A relação estequiométrica entre elas é chamada de grau de cristalinidade (DE PAOLI, 2008).

Algumas propriedades físicas e mecânicas estão relacionadas de forma direta com o grau de cristalinidade do polímero e da morfologia de suas regiões cristalinas, ou seja, quanto mais cristalinos os polímeros, maiores serão os valores destas propriedades, são elas: rigidez, resistência química, densidade, estabilidade dimensional, resistência à abrasão, a temperatura de transição vítrea e o ponto de fusão. Por outro lado, a cristalinidade causa a diminuição de outras propriedades, como resistência ao impacto, alongamento na ruptura, claridade ótica e resistência ao fenômeno do *stress-cracking* (microfissuramento sob tensão) (LODI, 2003).

A temperatura de transição vítrea representa a temperatura para qual é iniciado o movimento molecular nas regiões amorfas do polímero e o ponto de fusão é a temperatura

para qual as forças que ligam as moléculas nas regiões cristalinas são ultrapassadas pela energia térmica (LOPES e DE LURDES LOPES, 2010).

O tipo de polímero que constitui um geossintético não é o único fator que influencia o seu comportamento. É necessário considerar outros fatores, tais como a estrutura, o processo de fabricação e o efeito de confinamento exercido pelo solo (PAULA, 2003). Uma comparação das propriedades dos polímeros base é mostrada no Quadro 2.

Quadro 2 – Comparação das propriedades dos polímeros base.

PROPRIEDADES		POLÍMEROS				
		Poliéster	Poliamida	Polipropileno	Polietileno	
Resistência		3	2	1	1	
Módulo de Elasticidade		3	2	1	1	
Deformação na Ruptura		2	2	3	3	
Fluência		1	2	3	3	
Densidade relativa		3	2	1	1	
Custo		3	2	1	1	
Resistência a	Radiação UV	Estabilizado	3	2	3	3
		Não estabilizado	3	2	2	1
	Bases	1	3	3	3	
	Microrganismos	2	2	2	3	
	Óleos	2	2	1	1	
	Detergentes	3	3	3	3	

Fonte: LADEIRA, 1995 apud PAULA (2003, p. 11).

Legenda: 3 - Elevado; 2 - Médio; 1 - Baixo.

### 2.1.3.2 Aditivos

A estabilização de polímeros pode ser dividida em dois tipos: preventiva e por aditivação. O primeiro caso consiste na otimização da síntese do polímero permitindo melhorar a sua durabilidade. No entanto, o método de estabilização mais frequente é por aditivação, que é a incorporação de aditivos nos materiais de forma a se conseguir um dado efeito técnico no produto final (VALENTE, 2008).

Os produtos constituídos por polímeros têm suas propriedades melhoradas pela incorporação de aditivos, cuja função é minimizar a intensidade dos fenômenos de degradação (PINTO, 2006). O Policloreto de Vinila (PVC), por exemplo, não é, por si só, muito resistente às intempéries e precisa de aditivos. Os fotoestabilizadores adicionados absorvem a radiação UV e a convertem em calor, protegendo assim o polímero contra a radiação prejudicial (KOCKOTT, 1989).

A longa expectativa de vida útil dos polímeros deve-se, sobretudo, ao desenvolvimento de aditivos estabilizadores que impedem ou retardam a degradação e prolongam a vida útil do polímero em dez ou cem vezes (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012). Os aditivos podem ter diversas finalidades, tais como:

- Controle da polimerização: reguladores de crescimento em cadeia, aceleradores, compatibilizadores, promotores de reticulação;
- Melhoria do processamento: promotores de fluxo, plastificantes, antiderrapantes, lubrificantes, tixotrópicos, liberadores;
- Melhorando a resistência à degradação durante o processamento e o serviço: estabilizadores térmicos, estabilizadores UV, desativadores de metais, eliminadores de ácidos;
- Melhoria das propriedades mecânicas: agentes nucleantes, compatibilizadores, modificadores de impacto, agentes de reticulação, plastificantes, reforços fibrosos;
- Melhoria do desempenho do produto: anti-estática, agentes de expansão, agentes de fricção, retardadores de chama, plastificantes, supressores de fumaça;
- Melhoria das propriedades da superfície: promotores de aderência, agentes anti-embaciamento, agentes anti-bloqueio, surfactantes, aditivos anti-desgaste;
- Melhoria das propriedades ópticas: agentes nucleantes, pigmentos e corantes, branqueadores; e
- Redução de custo: extensores, enchimentos particulados (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012, p. 70-71).

Os aditivos devem ser eficientes no desempenho das suas funções, devem ser estáveis, possuir uma boa resistência à extração e não prejudicar as propriedades dos polímeros. Os aditivos são normalmente classificados de acordo com a sua função (e não de acordo com as suas propriedades químicas) (CARNEIRO, 2009). No Quadro 3 estão descritos alguns tipos de aditivos com suas finalidades.

Os aditivos mais utilizados para melhorar a resistência à degradação dos termoplásticos são os estabilizantes térmicos, os de proteção UV e os antioxidantes. Os vários estabilizantes existentes são considerados os aditivos mais importantes, chegando em alguns

casos a ser o único aditivo utilizado. Os estabilizantes térmicos permitem evitar a decomposição térmica prematura dos polímeros, quando submetidos a condições de temperatura elevada (LOPES e DE LURDES LOPES, 2010).

Quadro 3 – Descrição de alguns tipos de aditivos.

Tipo	Finalidade
Estabilizadores	Aumentam a durabilidade do material. Deste grupo fazem parte os estabilizadores térmicos, de radiação UV ou de luz.
Antioxidantes	Retardam ou reduzem as reações de oxidação.
Plastificantes	Melhoram a processabilidade e flexibilidade dos materiais.
Lubrificantes	Reduzem a viscosidade do polímero durante o seu processamento reduzindo a aderência do material ao equipamento.
Agentes antiestáticos	Reduzem a resistência elétrica do material.
Retardadores de chama	Aumentam o tempo que o material leva a iniciar a combustão ou tornam a progressão da chama mais lenta.
Pigmentos e corantes	Utilizados para alterar a cor ou aparência do material.
Agentes de expansão ou espumantes	Geram gases durante o processamento, provocando a expansão do material e reduzindo a sua densidade.
Nucleantes	Servem para iniciar um processo de cristalização ou de formação de fases cristalinas na massa polimérica.
Modificadores de impacto	São geralmente borrachas introduzidas na massa polimérica para servir como absorvedores de impacto, aumentando assim a resistência ao impacto.
Agentes de reforço	São materiais orgânicos ou inorgânicos, em geral fibras, introduzidas no material para melhorar as suas propriedades mecânicas de forma controlada.

Fonte: Adaptado de VALENTE (2008, p. 30-31).

Estabilizadores de luz e radiação UV servem para inibir reações de degradação causadas pela exposição à luz solar ou artificial. Essa exposição pode ter efeitos adversos nos materiais, contribuindo significativamente para a degradação dos polímeros, especialmente na presença de oxigênio. A luz e o oxigênio causam reações de degradação nos plásticos alterando as suas propriedades físicas e mecânicas (VALENTE, 2008).

Dois tipos de fotoestabilizadores comumente encontrados são o negro de fumo e as aminas estericamente impedidas. O negro de fumo atua como eficiente absorvedor de radiação UV, como aprisionador de radicais livres e desativador de estados excitados. As aminas estericamente impedidas atuam fundamentalmente como aprisionadores de radicais livres. No caso dos processos de foto-oxidação a estrutura desta classe de aminas é alterada

durante sua exposição à radiação UV formando radicais nitroxila (AGNELLI e CHINELATTO, 1992).

Os aditivos devem ser estáveis à altas temperaturas, pressões e taxas de cisalhamento durante o processamento. Devem, ainda, ser suficientemente resistentes a impurezas que possam ocorrer no produto, devem ser compatíveis com os outros aditivos utilizados, e não devem evaporar ou sublimar em altas temperaturas ou migrar e lixiviar quando o produto é imerso em água ou outros líquidos comuns (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012). A Tabela 1 mostra uma lista de polímeros em geossintéticos comumente usados, em porcentagem do peso na composição, e os aditivos incorporados.

Tabela 1 – Porcentagem em peso da composição dos polímeros comumente usados na fabricação de geossintéticos.

<b>Tipo de Polímero</b>	<b>Base Polimérica</b>	<b>Vários aditivos</b>	<b>Negro de Fumo ou Pigmento</b>	<b>Filler</b>	<b>Plastificante</b>
Polietileno	97	0.5-1.0	2-3	0	0
Polipropileno	96	1-2	2-3	0	0
PVC (não plastificado)	80	2-3	5-10	10	0
PVC (plastificado)	35	2-3	5-10	25	30
Poliéster	97	0.5-1.0	2-3	0	0
Poliestireno	97	0.5-1.0	2-3	0	0
Polietileno clorossulfonado	45	5-7	20-25	20-25	0

Fonte: KOERNER, 1993 apud GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP (2012, p.72).

Os aditivos antioxidantes são utilizados para evitar a degradação por oxidação devido a elevada presença de oxigênio no ambiente. Com estes estabilizantes pretende-se eliminar a oxidação, tanto durante a fase de processamento do material, quanto durante o seu tempo de vida. Os antioxidantes evitam que a aparência e as propriedades físicas dos polímeros sejam deterioradas pela degradação por oxidação das ligações no polímero (LOPES e DE LURDES LOPES, 2010).

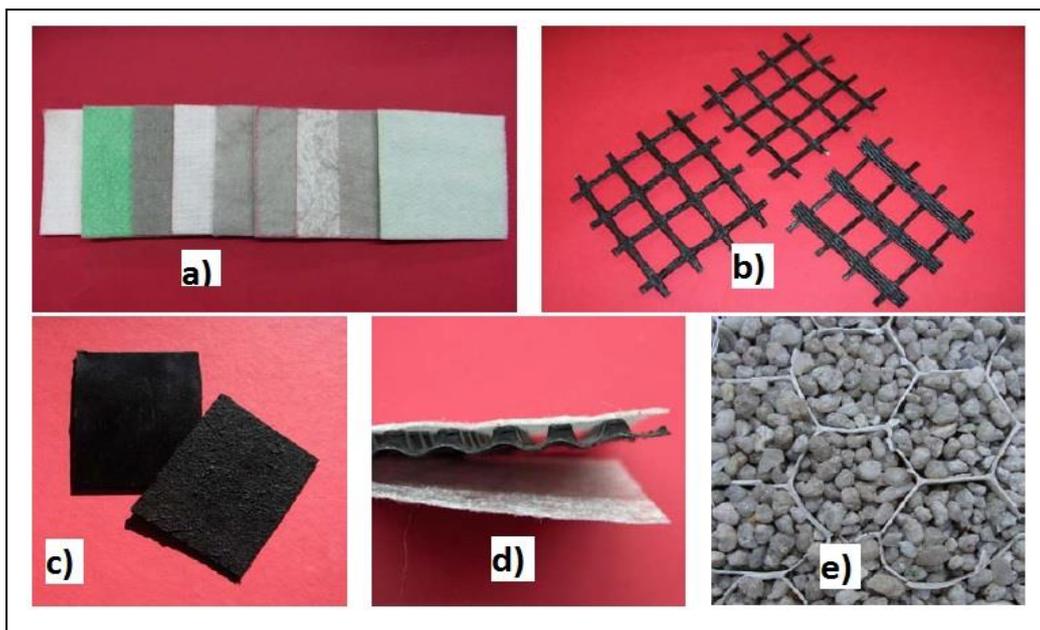
Duas classes de aditivos atuam basicamente como antioxidantes secundários: os fosfitos ou fosfonitos aromáticos, e os tioéteres. Os fosfitos, utilizados em conjunto com um

fenol estericamente impedido, atuam como estabilizantes de processamento, particularmente ativos quando o polímero está no estado fundido. Os tioéteres permanecem predominantemente ativos quando o polímero está no estado sólido, sendo bastante eficientes como estabilizantes de longos períodos em que o polímero pode ficar submetido ao calor (AGNELLI e CHINELATTO, 1992).

#### 2.1.4 Classificação dos geossintéticos

Os geossintéticos podem ser classificados de acordo com as diferenças estruturais existentes entre os diferentes materiais (CARNEIRO, 2009). Na Figura 3 pode-se ver alguns exemplos de geossintéticos. De um modo simples, os geossintéticos podem ser divididos em geotêxteis, geomembranas e produtos relacionados (VERTEMATTI, 2001). No Quadro 4 pode-se ver os nomes e a classificação dos geossintéticos.

Figura 3 – Alguns exemplos de geossintéticos.



Fonte: CARNEIRO (2009, p. 7).

Legenda: (a) geotêxteis; (b) geogrelhas; (c) geomembranas; (d) geocompósito de drenagem; (e) geocélulas.

Quadro 4 – Classificação dos Geossintéticos.

<b>Terminologia</b>	<b>Nome</b>	<b>Definição</b>
GB	Geobarra	Produto em forma de barra com função predominante de reforço.
GL	Geocélula	Produto com estrutura tridimensional aberta, constituída de células interligadas, que confinam mecanicamente os materiais nela inseridos, com função predominante de reforço e controle de erosão.
GC	Geocomposto	Produto industrializado formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica.
GS	Geoespaçador	Produto com estrutura tridimensional constituída de forma a apresentar grande volume de vazios, utilizado predominantemente como meio drenante.
GE	Geoexpandido	Produto fabricado a partir de um polímero expandido formando uma estrutura tridimensional leve, com finalidade principal de aliviar o peso de uma estrutura geotécnica.
GF	Geoforma	Estrutura realizada a partir de geossintéticos, com a finalidade de conter materiais de modo permanente ou provisório.
GG	Geogrelha	Produto com estrutura em forma de grelha com função predominante de reforço, cujas aberturas permitem a interação do meio em que estão confinadas, constituído por elementos resistentes à tração.
GA	Geomanta	Produto com estrutura tridimensional permeável, usado para controle de erosão superficial do solo, também conhecido como biomanta no caso de ser biodegradável.
GM	Geomembrana	Produto bidimensional, de baixíssima permeabilidade, composto predominantemente por asfaltos, elastômeros ou plastômeros, utilizado para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação.
GN	Georrede	Produto com estrutura em forma de grelha, com função predominante de drenagem.
GT	Geotêxtil	Produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não-tecidas ou tricotadas que podem desempenhar várias funções numa obra geotécnica.
GI	Geotira	Produto em forma de tira com função predominante de reforço.
GP	Geotubo	Produto de forma tubular com função drenante.

Fonte: VETERMATTI (2001, p. 9-13).

### 2.1.5 Funções dos geossintéticos

Função é uma ação peculiar que um produto deve desenvolver para que o objetivo de sua aplicação seja alcançado com sucesso. A função de um material está diretamente relacionada à combinação de propriedades do material (LOPES e DE LURDES LOPES,

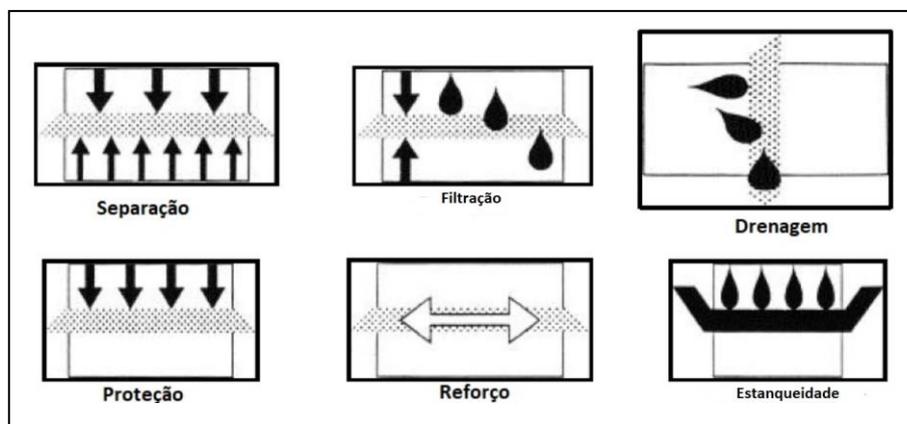
2010). No Quadro 5 estão descritas as funções que podem ser desempenhadas por estes materiais e na Figura 4 uma ilustração das principais funções.

Quadro 5 – Funções que os Geossintéticos podem desempenhar.

Função	Objetivo
Drenagem	Coletar e conduzir águas pluviais, água subterrâneas e outros fluidos no plano de um material geossintético.
Filtração	Restringir a passagem sem controle, de partículas do solo ou outro material, submetidas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem do fluido em movimento pelo ou no interior de um geossintético.
Proteção	Prevenir ou limitar danos localizados em um dado elemento ou material, pelo uso de um material geossintético.
Reforço	Uso do comportamento tensão-deformação de um material geossintético, para melhorar o comportamento mecânico do solo ou de outros materiais de construção.
Separação	Prevenir a mistura de dois materiais adjacentes de natureza diferente, solos ou material de aterro, pelo uso de um material geossintético.
Controle de erosão superficial	Usar um material geossintético para prevenir ou limitar os movimentos do solo ou de outras partículas na superfície, por exemplo, de um talude.
Barreira	Usar um geossintético para prevenir ou limitar a migração de fluidos.
Alívio de Tensões	Usar um geossintético para retardar o desenvolvimento de trincas pela absorção das tensões que surgem no pavimento danificado.

Fonte: ABNT NBR ISO 10318-1 (2018, p. 1-2).

Figura 4 – Principais funções dos geossintéticos.



Fonte: PAULA (2003, p. 5).

Um geossintético desempenha, muitas vezes, várias funções simultaneamente numa mesma aplicação. Logo, para o adequado dimensionamento faz-se necessário definir quais são

essas funções e hierarquizá-las (DAS NEVES, 2003). A seguir são descritas cada uma das funções que podem ser exercidas pelos geossintéticos.

- **Drenagem:** Consiste em recolher e transportar águas pluviais, águas freáticas e/ou outros fluidos ao longo do plano de um geotêxtil ou de um produto relacionado. As exigências fundamentais são as de assegurar a evacuação da água ou gás no plano do geossintético com uma pequena perda de carga, o que se consegue garantido que este apresente espessura e compressibilidade adequadas e que a dimensão das aberturas seja tal que impeça a passagem das partículas sólidas e o bloqueio ou colmatação (BALTAZAR, 2008).

- **Filtração:** O geossintético funciona como filtro de um sistema drenante em obras geotécnicas e geoambientais, de forma semelhante a filtros granulares convencionais. Pode também ser utilizado como elemento filtrante para a redução do potencial poluente de lixiviados e resíduos (PALMEIRA, 2018). Esta função envolve o movimento de fluidos através dos geossintéticos (fluxo normal ao plano dos materiais) e retenção simultânea do solo no sentido do fluxo (CARNEIRO, 2009).

- **Proteção:** É a função de prevenção ou limitação dos danos localizados em um dado elemento ou material, pelo uso de um material geossintético (ABNT NBR ISO 10318-1, 2018). Um geossintético desempenha a função de proteção quando é colocado entre dois materiais, de forma a absorver e distribuir as tensões e deformações transmitidas ao material a ser protegido. O geossintético deve então exibir propriedades mecânicas e espessura adequadas e deve apresentar continuidade (BALTAZAR, 2008).

- **Reforço:** Consiste no uso do comportamento tensão-deformação de um material geossintético, para melhorar o comportamento mecânico do solo ou de outros materiais de construção (ABNT NBR ISO 10318-1, 2018). O reforço de solos funciona como um melhoramento mecânico do solo. Permite que o solo suporte esforços de corte superiores aos que suportaria de outra forma (DAS NEVES, 2003).

- **Separação:** Quando um geossintético é usado para manter materiais diferentes, para que ambos estejam disponíveis durante a vida útil prevista, a principal função desempenhada é a de separação. De certo modo, todos os geossintéticos podem desempenhar a função de separação, mas geralmente são os geotêxteis que são utilizados como separadores em sua função principal (KOERNER e SOONG, 1995).

- **Controle de erosão superficial:** Consiste no uso de um material geossintético para prevenir ou limitar os movimentos do solo ou de outras partículas na superfície, por exemplo, de um talude (ABNT NBR ISO 10318-1, 2018). Esta função pode ser desempenhada de forma provisória (utilizando geossintéticos biodegradáveis) ou de forma permanente (por exemplo, para prevenir a erosão costeira) (CARNEIRO, 2009).

- **Barreira de fluidos:** Nesse caso, a camada de geossintético tem a função de barrar ou minimizar a passagem de fluidos ou gases. Tal aplicação é de particular importância em obras de proteção ambiental e em obras hidráulicas. Geossintéticos podem também funcionar como barreiras de sedimentos em obras de controle de erosões ou para retardar a movimentação de dunas (PALMEIRA, 2018).

Vetermatti (2015) traz os principais tipos de geossintéticos encontrados no mercado e suas respectivas funções, conforme Quadro 6.

Quadro 6 – Funções dos vários geossintéticos em projetos de engenharia.

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geotêxtil	X	X	X	X	X	X	*
Geogrelha	X	-	-	-	-	X	-
Geomembrana	X	-	-	-	-	-	X
Georrede	-	X	-	X	-	-	-
Geocomposto argiloso	-	-	-	-	-	-	X
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geotubo	-	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-

\*Quando impregnado com material asfáltico

Fonte: VERTEMATTI (2015, p. 48).

### 2.1.6 Aplicações dos geossintéticos

As aplicações de geossintéticos são muitas e variadas. A Sociedade Internacional de Geossintéticos lista como principais áreas de aplicação: Ruas não pavimentadas, Engenharia Rodoviária, Ferrovias, Muros, Encostas, Aterros sobre solos moles, Aterros sanitários,

Tratamento de água, Projetos de Engenharia Hidráulica, Drenagem e Filtração, Controle de erosão e Aplicações agrícolas (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012). No Quadro 7 pode-se ver alguns exemplos dessas aplicações com seus principais requisitos de durabilidade.

Quadro 7 – Exemplos de aplicação de geossintéticos.

Aplicação	Tipos de geossintético	Requisito de durabilidade principal	Observações
Estradas: camada de separação sob sub-base	Geotêxtil não tecido ou tecido	Resistência a danos causados pelo tráfego	Os danos na instalação também precisam ser considerados
Ferrovias: camada de separação sob lastro	Geotêxtil não tecido ou tecido	Resistência a danos e abrasão no tráfego	Os danos na instalação também precisam ser considerados
Controle de erosão superficial de taludes para limitar a perda de solo e melhorar o crescimento da vegetação.	Geomanta ou geogrelha	Resistência ao intemperismo	-
Drenagem	Geodrenos	Resistência à fluência e degradação por agentes químicos.	Os danos na instalação também precisam ser considerados.
Muros de contenção	Geogrelhas, geotêxteis ou geocompostos de alta resistência	Resistência a danos, fluência, ataque químico geral e, em alguns casos, intemperismo a longo prazo	Os danos na instalação também precisam ser considerados
Revestimento de túneis	Geomembranas	Resistência a degradação por agentes químicos e qualidade das soldas	A resistência ao fogo também é importante, embora isso não seja considerado no cálculo de vida útil.
Proteção de barragens de concreto	Geomembranas	Resistência a intempéries a longo prazo, durabilidade contra ataques químicos, incluindo resistência à lixiviação e qualidade das soldas	-
Revestimento de reservatórios e canais	Geomembranas	Resistência a intempéries a longo prazo, durabilidade contra ataques químicos, incluindo resistência à lixiviação e qualidade das soldas	-
Estruturas marinhas	Geotêxteis não tecidos formando tubos ou sacos e preenchidos com areia	Resistência a intempéries a longo prazo, fluência, abrasão e água	-
Aterros sanitários	Geomembranas	Resistência à oxidação e hidrólise, intemperismo, fluência	Os danos na instalação também precisam ser considerados

Fonte: Adaptado de GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP (2012, p. 74-82).

### 2.1.7 Propriedades dos geossintéticos

Os geossintéticos podem desempenhar várias funções simultaneamente, de acordo com o tipo de aplicação. Para que desempenhem essas funções corretamente é necessário que os geossintéticos mantenham suas propriedades básicas durante todo o tempo de vida útil para o qual foi dimensionado. As propriedades dos geossintéticos podem ser divididas em físicas, hidráulicas, mecânicas e relativas à durabilidade (ROSETE, 2010). O Quadro 8 apresenta um comparativo das propriedades dos geossintéticos em relação com os polímeros constituintes.

A degradação dos materiais geossintéticos pode ser avaliada com o monitoramento das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. Deste modo, é possível identificar uma eventual alteração no comportamento dos geossintéticos, fornecendo dados úteis para projeto e permitindo o conhecimento dos mecanismos causadores de danos e seus efeitos (MOREIRA, 2009).

A necessidade de controlar as propriedades dos geossintéticos levou muitos países e alguns organismos internacionais a desenvolverem normas de ensaio próprias para este fim. No entanto, sendo o comportamento dos geossintéticos muito dependente das condições de ensaio, os resultados dos ensaios realizados, segundo normas diferentes para a definição de uma mesma propriedade, não são comparáveis (BALTAZAR, 2008).

A maioria dos autores agrupam as propriedades dos geossintéticos em Propriedades físicas (massa por unidade de área, densidade relativa dos polímeros de que são constituídos e espessura), Propriedades mecânicas (comportamento à tração, fluência, resistência ao puncionamento, resistência ao rasgo e atrito nas interfaces), Propriedades hidráulicas (distribuição e dimensão das aberturas, permissividade e transmissividade) e Propriedades referentes à durabilidade (danificação durante a instalação, abrasão e resistência aos agentes de degradação físicos, químicos e biológicos) (MILAGRES, 2016).

A seguir são descritas as principais propriedades físicas, mecânicas hidráulicas e de durabilidade dos geossintéticos.

### 2.1.7.1. Propriedades físicas

**Massa por unidade de área:** A massa por unidade de área, ou gramatura, é definido como a massa dividida por sua área em planta, sendo internacionalmente simbolizada por  $M_A$ . A massa por unidade de área dos geossintéticos é obtida determinando-se a massa de espécimes com área conhecida por meio de balanças de precisão (PALMEIRA, 2018). A massa por unidade de área dos geossintéticos é determinada de acordo com a ABNT NBR ISO 9864:2013 - Geossintéticos — Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.

Geralmente é dado em unidades de grama por metro quadrado ( $\text{g/m}^2$ ). É determinado pela pesagem de corpos de prova quadrados ou circulares de dimensões conhecidas (geralmente área não inferior a  $100 \text{ cm}^2$ ), cortadas em pontos distribuídos por toda a largura e comprimento da amostra. As dimensões lineares devem ser medidas sem qualquer tensão na amostra. Os valores são então calculados para obter a massa média por unidade de área da amostra de laboratório (SHUKLA e YIN, 2006).

Tal propriedade é um indicador da uniformidade e da qualidade de um geossintético, podendo ser usada para identificação de um produto. Para um dado tipo de polímero e de processo de fabricação, a gramatura pode ser diretamente relacionada com as propriedades mecânicas (BALTAZAR, 2008).

A massa por unidade de área fornece algumas indicações sobre o custo dos geossintéticos, além de pode ser um indicador dos valores de algumas propriedades mecânicas (como a resistência à tração ou a resistência ao puncionamento estático) e é muitas vezes utilizada de forma errada para identificar o geossintético que pode ser utilizado numa dada aplicação (CARNEIRO, 2009).

**Densidade relativa:** A densidade relativa dos polímeros é expressa em grandeza adimensional e é definida como a razão entre a massa em volume dos elementos que constituem o geossintético e a massa em volume da água a  $4^\circ \text{ C}$  ( $1,0 \text{ g/cm}^3$ ). É um indicador do tipo de polímero e, como tal, pode ser usado para identificação e controle de qualidade. Permite avaliar se o geossintético flutua, o que pode ser importante em algumas aplicações (BALTAZAR, 2008).

**Espessura:** A espessura de um geossintético é definida como a distância entre as superfícies paralelas que limitam seu volume, expressa em mm, medida para uma

determinada tensão nominal. Leituras de medidores de deslocamento permitem obter a espessura do geotêxtil para diferentes tensões nominais. Define-se como espessura nominal a que é obtida sob uma pressão de 2 kPa (PALMEIRA, 2018).

A espessura é uma das propriedades físicas básicas usadas para controlar a qualidade de muitos geossintéticos. Os valores de espessura são necessários no cálculo de alguns parâmetros geossintéticos, como a permissividade e a transmissividade. Como muitos geossintéticos, particularmente geotêxteis e alguns geocompostos de drenagem, são altamente compressíveis, a medida da espessura dependerá muito da tensão compressiva normal aplicada (SHUKLA e YIN, 2006).

Os valores usuais situam-se entre 0.2 e 5 mm para os geotêxteis não tecidos e 0.2 e 1.5 mm para os geotêxteis tecidos. As relações entre a espessura e a pressão permitem avaliar a compressibilidade dos geossintéticos. A espessura dos materiais geossintéticos tem influência direta no seu comportamento mecânico e hidráulico (DAS NEVES, 2003).

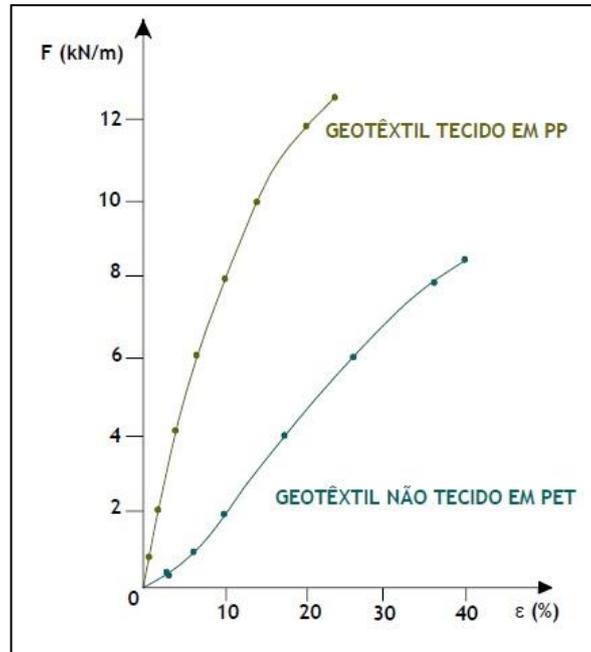
#### **2.1.7.2 Propriedades mecânicas**

**Comportamento à tração:** O Comportamento à tração dos geossintéticos depende de fatores como o polímero constituinte, a estrutura, o processo de fabricação e o tipo de ligação, entre outros. De forma simplificada, a deformação total de um geossintético é composta por duas parcelas: uma relativa à deformação dos componentes (mais significativa em geogrelhas e geotêxteis tecidos) e outra relativa à deformação estrutural (mais importante em geotêxteis não tecidos) (BALTAZAR, 2008).

A resposta dos geossintéticos sujeitos a tração é, usualmente, caracterizada pela curva que relaciona a força por unidade de largura (em kN/m) com as extensões expressas em percentagem. A partir desta curva, é possível obter a resistência à tração (força por unidade de largura na ruptura), a extensão na ruptura e o módulo de rigidez (razão entre a força por unidade de largura e a extensão correspondente) (CARNEIRO, 2009)

Enquanto para os geotêxteis tecidos e outros geossintéticos, o material constituinte é determinante para as suas propriedades sendo a sua deformação controlada pela primeira parcela (deformação dos componentes), no caso dos geotêxteis não tecidos, é a estrutura do material (deformação estrutural) que desempenha um papel preponderante, conforme Figura 5 (DAS NEVES, 2003).

Figura 5 – Curvas tração-deformação de geotêxteis tecidos e não tecidos.



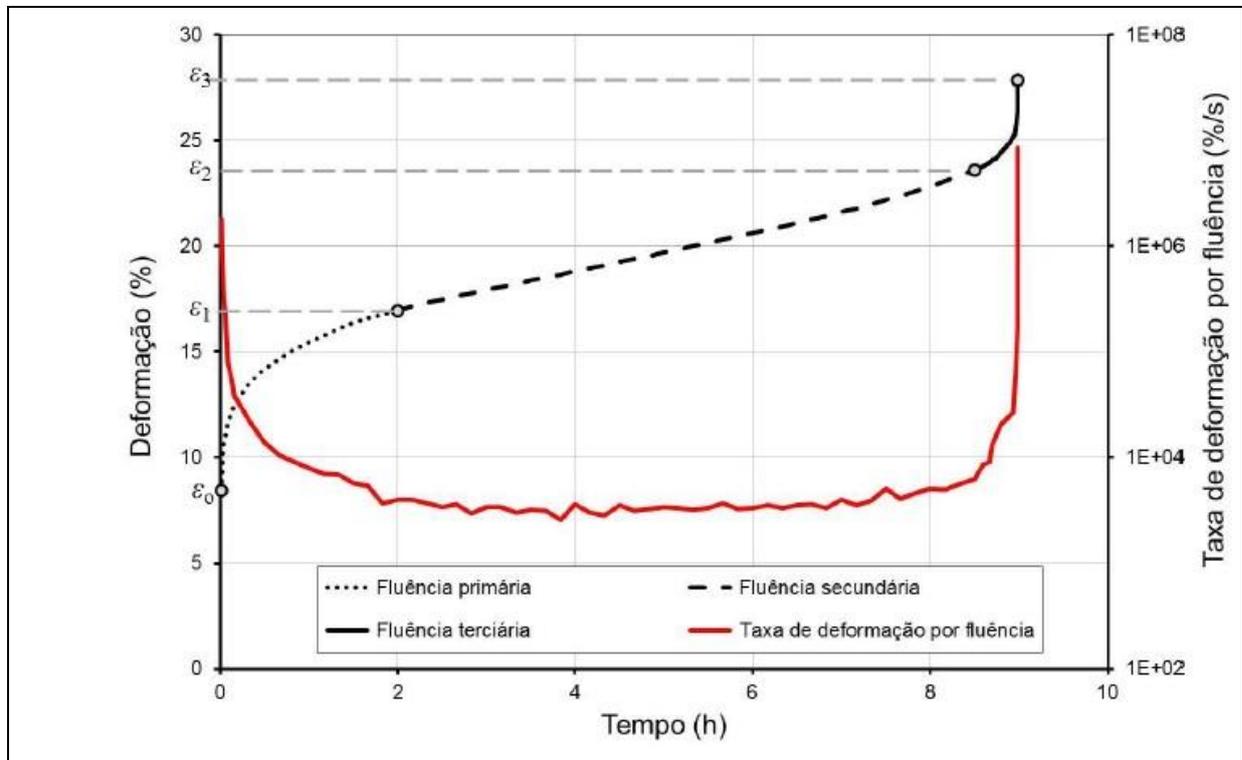
Fonte: DAS NEVES (2003, p. 76).

A resistência à tração pode ser obtida pelos ensaios de tração em faixa larga (ABNT NBR ISO 10319:2013 e ASTM D4595:2009) e ensaios de tração em faixa estreita (ASTM D5035:11, 2019).

**Fluência:** Denomina-se Fluência o fenômeno no qual um dado material sofre deformações ao longo do tempo, quando submetido a um carregamento constante (FRANÇA, 2012). É um aspecto bastante significativo no dimensionamento dos geossintéticos, em particular, para tempos de serviço longos. A fluência dos geossintéticos depende essencialmente do tipo de polímero (CARNEIRO, 2009).

As deformações por fluência nos geossintéticos apresentam-se divididas em três fases caracterizadas pela variação na taxa de deformação (Figura 6). A primeira parte da curva é constituída pela fluência primária e possui como principal característica um decréscimo nos valores de taxa de deformação por fluência (FRANÇA, 2012).

Figura 6 – Exemplo das fases da fluência de um geotêxtil tecido de polipropileno submetido a uma solicitação de tração igual a 67% de sua resistência, no sentido transversal de fabricação.



Fonte: FRANÇA (2012, p. 41).

No estágio de fluência primária, as deformações se desenvolvem rapidamente, ao passo que a taxa de deformação decresce. Após esse período, tem-se início a fase de fluência secundária na qual a taxa de deformação torna-se praticamente constante, atingindo um valor mínimo, a partir do qual começa a aumentar (*creep* terciário) culminando então, com a ruptura (COSTA, 1999).

**Resistência ao puncionamento:** A resistência ao puncionamento é inversamente proporcional à vulnerabilidade dos geossintéticos às compressões diferenciais ou a choques causados pela queda de materiais. É importante determinar a resistência dos geossintéticos ao puncionamento sob condições estáticas e sob condições dinâmicas (testes de impacto) (CARNEIRO, 2009).

A resistência ao puncionamento é definida com base na medição da vulnerabilidade dos geossintéticos às compressões diferenciais ou a choques. A solicitação pode ser concentrada, estática ou dinâmica e, consoante o mecanismo que lhe dá origem, a resistência

ao puncionamento pode ser quantificada por um comprimento, uma força ou uma pressão (MOREIRA, 2009).

**Resistência ao rasgamento:** Quanto a resistência ao rasgamento, os geossintéticos podem estar sujeitos a tensões de rasgamento nas suas mais variadas aplicações. A força de rasgamento (em N) mede a resistência dos geossintéticos à propagação de rasgos locais (CARNEIRO, 2009). Define-se rasgamento como a rotura progressiva resultante de duas ações: uma localizada, do tipo “perfuração”, e outra distribuída, do tipo “tração” (BALTAZAR, 2008).

**Atrito nas interfaces:** O atrito nas interfaces é uma das mais importantes propriedades mecânicas quando os geossintéticos desempenham funções de reforço. A transferência de tensões do solo (ou de um outro material de construção) para o reforço é feita através da interação entre eles (CARNEIRO, 2009). A caracterização dessa interação é feita com base na resistência ao corte da interface solo-geossintético sendo, geralmente, expressa em  $\text{kN/m}^2$  e podendo ser representada por uma lei idêntica à lei de Mohr – Coulomb, ou seja, através da coesão e do ângulo de atrito (MOREIRA, 2009).

A resistência ao corte da interface é resultado da mobilização de atrito lateral entre o solo e o geossintético e da mobilização do impulso passivo nos seus elementos transversais, caso a dimensão das suas aberturas seja superior à dos grãos de solo (como no caso das geogrelhas). A resistência ao corte da interface solo-geossintético será sempre menor ou igual à do solo, dependendo de fatores como a rugosidade do geossintético e da granulometria do solo, entre outros (BALTAZAR, 2008).

### 2.1.7.3 Propriedades hidráulicas

**Permeabilidade normal ao plano - Permissividade:** A permissividade de um geossintético (geralmente geotêxtil) é o coeficiente de permeabilidade ao fluxo de água normal ao seu plano dividido pela sua espessura. Essa propriedade é a principal medida da capacidade de fluxo de água no plano geossintético (SHUKLA, 2002).

Para a caracterização dos geotêxteis com funções de filtragem, é importante conhecer o fluxo de água através do material, já que é necessário que este permita que o fluxo se estabeleça, sem impedimentos. A permissividade depende da distribuição e dimensão das

aberturas, apresentando, usualmente, valores para os geotêxteis tecidos entre  $0.05$  e  $0.5 \text{ s}^{-1}$  e entre  $0.2$  e  $2.5 \text{ s}^{-1}$  para os não tecidos (DAS NEVES, 2003).

A permeabilidade normal ao plano (em  $\text{m.s}^{-1}$ ) é muitas vezes expressa em termos de permissividade (em  $\text{s}^{-1}$ ), obtida através da divisão do coeficiente de permeabilidade normal ao plano pela espessura do geossintético (CARNEIRO, 2009).

**Permeabilidade no plano - Transmissividade:** A transmissividade de um geossintético é o produto da permeabilidade ao fluxo de água no plano e sua espessura. Esta é a melhor propriedade para medida da capacidade de fluxo de água no plano de um geossintético e é amplamente utilizado em aplicações de drenagem (SHUKLA, 2002). A transmissividade depende da espessura e, portanto, das pressões aplicadas ao geossintético, e da distribuição e dimensão das aberturas (DAS NEVES, 2003).

Os geotêxteis tecidos e os não tecidos termoligados possuem normalmente transmissividades pequenas, enquanto que as georredes e os geotêxteis não tecidos agulhados possuem transmissividades relativamente elevadas, por isso os últimos são amplamente utilizados como drenos (CARNEIRO, 2009).

#### 2.1.7.4 Propriedades de durabilidade

A durabilidade consiste na determinação do intervalo de tempo durante o qual um geossintético poderá manter, dentro dos valores mínimos requeridos, suas propriedades, num dado meio ambiente. Apesar das vantagens econômicas associadas ao emprego de geossintéticos em obras de terra e em obras de caráter ambiental, a utilização destes materiais ainda é limitada pela existência de dúvidas quanto a manutenção das características dos geossintéticos ao longo do tempo (MOREIRA, 2009).

**Danificação durante a instalação:** Os danos causados pelas operações de instalação resultam essencialmente das operações de colocação e compactação do material de aterro com os geossintéticos. Os danos durante a instalação dos geossintéticos podem provocar alteração nas propriedades dos materiais, tanto no curto, quanto no longo prazo, e pode comprometer o exercício adequado da função exigida ao material na obra. (PAULA, 2003).

A instalação em obra pode provocar vários danos nos geossintéticos, como furos e rasgos e, em alguns casos, as tensões causadas pelas operações de instalação podem ser mais

severas do que aquelas a que os geossintéticos estarão submetidos durante a fase de operação (CARNEIRO, 2009).

**Abrasão:** A abrasão é o desgaste sofrido pelos geossintéticos por contato (fricção) com outra superfície ou com outros materiais de construção (agregados sujeitos a cargas cíclicas de pequena amplitude) (CARNEIRO, 2009). A capacidade de um geossintético resistir ao desgaste devido ao atrito ou fricção é chamada de resistência à abrasão (SHUKLA e YIN, 2006).

**Resistência aos agentes de degradação físicos, químicos e biológicos:** Durante o seu tempo de serviço, os geossintéticos podem estar sujeitos à ação de vários agentes de degradação físicos, químicos e biológicos. Os agentes de degradação mais comuns incluem: ação da radiação solar e de outros agentes climáticos, ação da temperatura, oxidação (causada pela temperatura e radiação UV), ação de líquidos (absorção, extração de componentes, reações químicas com os polímeros) e ação de microrganismos (CARNEIRO, 2009).

## 2.2 Geotêxteis

Um geotêxtil é um geossintético permeável composto exclusivamente de têxteis. Os geotêxteis são utilizados em diversas aplicações junto com fundações, solo, rocha, terra ou qualquer outro material relacionado à engenharia geotécnica como parte integrante do projeto, estrutura ou sistema fabricado pelo homem (WIEWEL e LAMOREE, 2016).

Pode ainda, ser definido como um produto têxtil bidimensional permeável, composto de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios, formando estruturas tecidas, não tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhe várias funções numa obra geotécnica (VETERMATTI, 2001).

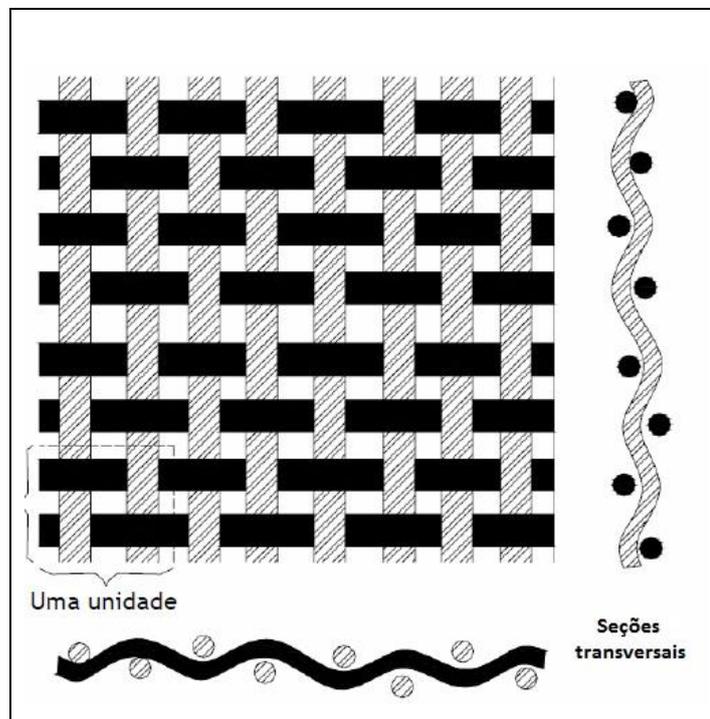
### 2.2.1 Classificação

A classificação dos geotêxteis em função do método de fabricação é a mais utilizada. Dependendo do processo de fabricação (e da estrutura), podem ser divididos em tecidos, não tecidos e tricotados (CARNEIRO, 2009). Os geotêxteis são normalmente fabricados por técnicas tecidas ou não. Os polímeros utilizados são geralmente materiais termoplásticos que

contêm variações das regiões amorfa e semicristalina (IGS, 2020). Os polímero mais utilizados na fabricação de fibras geotêxteis são o polipropileno e o poliéster (KOERNER, 2016).

**Geotêxteis tecidos** – Produto oriundo do entrelaçamento de fios, monofilamentos ou laminetes (fitas), seguindo direções preferenciais denominadas tramas (sentido transversal) e urdume (sentido longitudinal) (VETERMATTI, 2001). Essa configuração pode ser observada na Figura 7. São produzidos através de processos tradicionais de tecelagem, em que dois conjuntos de componentes (normalmente perpendiculares) são entrelaçados entre si, formando uma estrutura plana com poucos milímetros de espessura e com uma distribuição de poros relativamente regular (CARNEIRO, 2009).

Figura 7 – Estrutura típica dos geotêxteis tecidos.



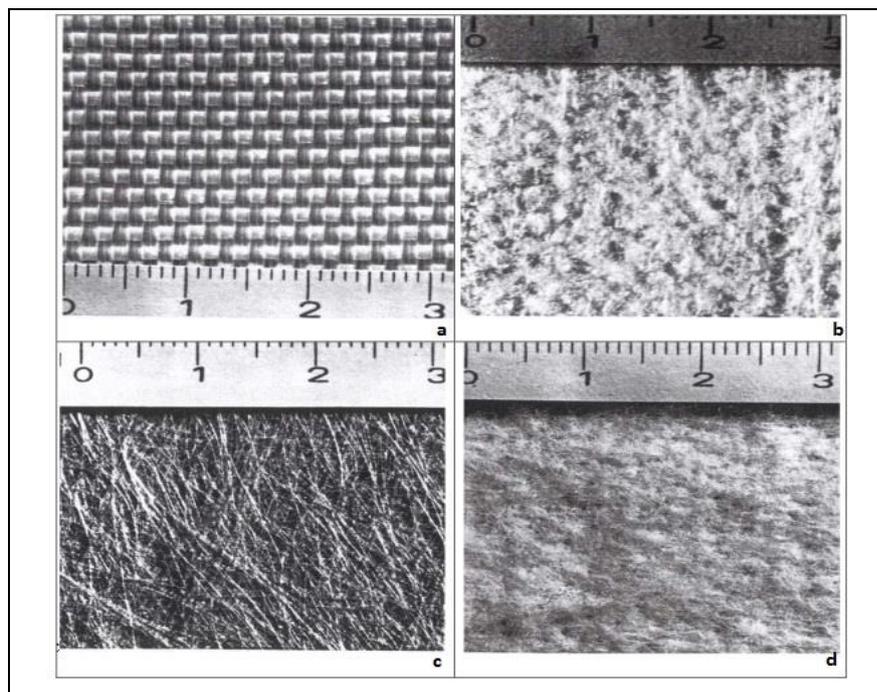
Fonte: Carneiro (2009, p. 20)

**Geotêxteis não tecidos** – Produto composto por fibras cortadas ou filamentos contínuos, distribuídos aleatoriamente, os quais são interligados por processos mecânicos, térmicos ou químicos (VETERMATTI, 2001). São produzidos dispondo os componentes (normalmente monofilamentos contínuos ou fibras) numa malha solta (mais espessa que o produto final) e suas ligações podem ser mecânicas, térmicas ou químicas. Os geotêxteis não

tecidos possuem uma estrutura plana com uma distribuição aleatória de poros (CARNEIRO, 2009).

A produção de geotêxteis não tecidos envolve geralmente, a utilização de um processo de fabricação contínuo denominado “*spunbonding*” que abrange desde a produção das fibras até a obtenção do produto final. Quanto ao tipo de ligação das fibras, pode-se distinguir geotêxteis agulhados, termoligados e resinados (COSTA, 1999). Na Figura 8 pode-se ver diferenças entre geotêxteis tecidos e não tecidos.

Figura 8 – Diferenças entre geotêxteis tecidos e não tecidos.



Fonte: FERREIRA GOMES (2001, p. 12)

Legenda: a) geotêxtil tecido, b) geotêxtil não tecido ligado quimicamente, c) geotêxtil não tecido ligado termicamente, e d) geotêxtil não tecido ligado mecanicamente (por agulhagem).

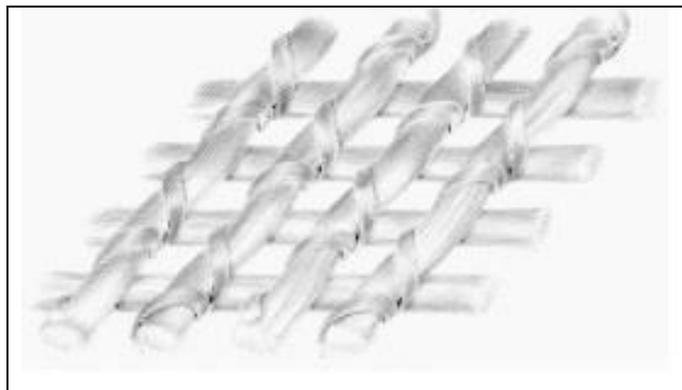
**Geotêxteis não tecidos agulhados (ligação mecânica dos fios):** As fibras são interligadas mecanicamente, por processo de agulhagem (VERTEMATTI, 2001). No processo mecânico, conhecido como “agulhagem”, a ligação das fibras ocorre com o entrelaçamento do material pela penetração das agulhas, repetidas vezes. A densidade da agulhagem na fabricação tem influência nas características e no desempenho do geotêxtil (CORREIA, 2010).

**Geotêxteis não tecidos termo-ligados (ligação térmica dos fios):** As fibras são interligadas por fusão parcial obtida por aquecimento (VERTEMATTI, 2001). No processo térmico, a ligação ocorre por fusão parcial das fibras, com a ligação de alguns pontos ou de regiões mais extensas da manta e apresentam espessuras reduzidas, da ordem de 0,5 a 1,0 mm (CORREIA, 2010).

**Geotêxteis não tecidos resinados (ligação química dos fios):** Quando a ligação das fibras ocorre pela aplicação de substâncias químicas no material, como a aplicação de resina acrílica por imersão ou pulverização, ocorre o processo químico (CORREIA, 2010).

**Geotêxteis tricotados** - São fabricados a partir do entrelaçamento de fios por feitos por meio de tricô, de modo a formarem uma estrutura plana (Figura 9). Não são muito empregados em razão de sofrerem grandes deformações por aplicação de carga. São utilizados basicamente para reforço (CARNEIRO, 2009).

Figura 9 – Geotêxtil tricotado.

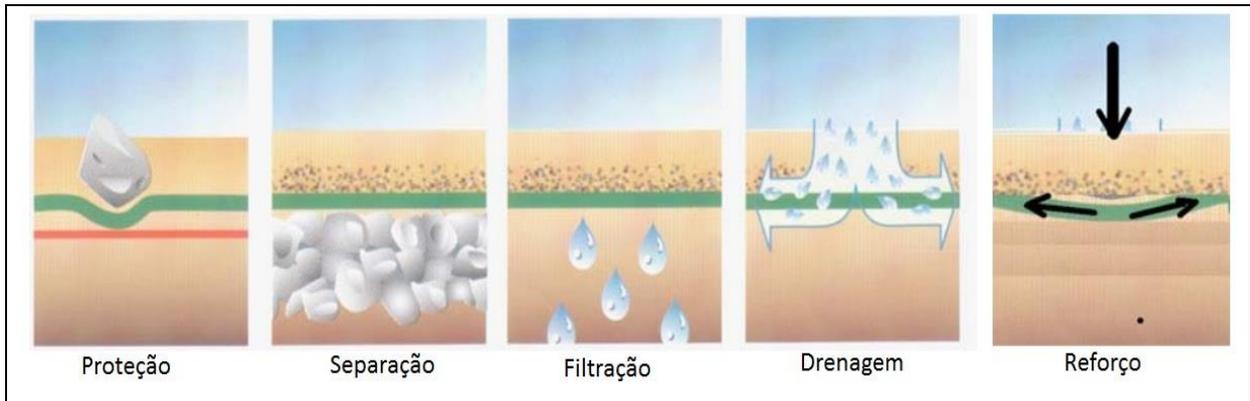


Fonte: Vetermatti (2001, p. 13)

### 2.2.2 Funções dos geotêxteis

O desempenho dos geotêxteis encontra-se essencialmente em cinco funções (Figura 10), as quais já foram comentadas para os geossintéticos de forma geral, e que são as seguintes: proteção, separação, filtração, drenagem e reforço (FERREIRA GOMES, 2001).

Figura 10 – Funções desempenhadas pelos geotêxteis.



Fonte: FERREIRA GOMES (2001, p. 13)

## 2.2.3 Propriedades dos geotêxteis

### 2.2.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas primárias dos geotêxteis são peso específico, massa por unidade de área, espessura e rigidez. Todas são propriedades com métodos simples de determinação (KOERNER e HSUAN, 2001). As propriedades físicas são mais afetadas pela temperatura e umidade, logo, para obter resultados consistentes em laboratório, é importante um bom controle do ambiente durante os ensaios (SHUKLA, 2002).

### 2.2.3.2 Propriedades hidráulicas

As principais propriedades hidráulicas de um geotêxtil são: permeabilidade, transmissividade, permissividade e abertura de filtração. A transmissividade é a capacidade do geotêxtil de transportar água através do seu plano, a permissividade é a capacidade do geotêxtil de deixar a água passar perpendicularmente a seu plano e a abertura de filtração é o parâmetro que avalia o tamanho do maior grão de solo capaz de atravessar o geotêxtil. (SUSUNAGA, 2015).

### 2.2.3.3 Propriedades mecânicas

Susunaga (2015) lista as propriedades mecânicas dos geotêxteis como: compressibilidade, resistência à tração, resistência à propagação do rasgo, resistência à

perfuração por impacto, resistência à perfuração por penetração, resistência à perfuração por estouro e fluência.

### 2.3 Durabilidade dos geossintéticos

Garantir a durabilidade é requisito fundamental para a aplicação de geossintéticos em Engenharia Civil. O tempo de vida útil para os geossintéticos varia entre um ano e mais de cem anos. Nesse período, os materiais devem desempenhar corretamente as funções para os quais foram projetados e instalados. Logo, é importante identificar as condições do meio onde irão estar expostos e prever como essas condições irão afetar as suas propriedades (CARNEIRO; MORAIS; LOPES, 2016).

O tempo de vida útil padrão estabelecido pode variar de 10, 25, 50 e 100 anos. As aplicações em aterros sanitários podem exigir tempos ainda mais longos, enquanto algumas aplicações não requerem durabilidade a longo prazo (GREENWOOD, 2015). Alguns exemplos de vida útil do projeto são vistos no Quadro 8.

Quadro 8 – Exemplos de tempos de vida útil de acordo com a aplicação do geossintético.

<b>Aplicação</b>	<b>Tempo de vida útil</b>
<b>Separação</b>	
como construção provisória	0,5 - 1 ano
como construção permanente	80 - 100 anos
<b>Filtro em aplicações de drenagem</b>	
substituível	10 - 25 anos
não substituível	80 - 100 anos
<b>Reforço</b>	
em uma barragem contra falha de deslizamento	5 anos
em estruturas de contenção	80 - 100 anos
<b>Drenagem, proteção</b>	100 anos
<b>Geomembranas: barragens e túneis</b>	100 - 200 anos
<b>Camadas de aterro</b>	100 - 1000 anos

Fonte: GREENWOOD<sup>1</sup> (2015).

Para se avaliar a durabilidade de estruturas utilizando geossintéticos é necessário um estudo dos efeitos do tempo nas propriedades funcionais. A estrutura física do geossintético, a

<sup>1</sup> Documento eletrônico não paginado

natureza do polímero usado, o processo de fabricação, o ambiente físico e químico, as condições de armazenamento, a instalação e a carga suportada pelo geossintético são todos parâmetros que governam a durabilidade. Logo, avaliar a evolução das propriedades funcionais ao longo da vida útil do projeto é um problema bastante complexo devido à combinação e interação de vários parâmetros presentes no ambiente (ISO/TS 13434, 2008).

A durabilidade de um geossintético dependerá: do tipo de polímero; da estrutura macroscópica do geossintético, como a espessura das geomembranas e o diâmetro das fibras; da pureza das matérias-primas utilizadas e a presença de impurezas; do processo de polimerização e os catalisadores utilizados, se houver; da copolimerização, que geralmente reduz a durabilidade; dos processos usados para criar o geossintético a partir do polímero base; da armazenagem das matérias-primas antes e depois do processamento; e dos aditivos (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012).

Os polímeros podem se deteriorar por inchamento e por dissolução. A ruptura de ligações covalentes na cadeia polimérica, como resultado da ação da energia térmica, de reações químicas, e da radiação é possível, normalmente com uma concomitante redução na integridade mecânica (PINTO, 2006).

A maioria dos geossintéticos, quando corretamente utilizados, são resistentes aos ataques químicos e microbiológicos encontrados em ambientes normais. Em aplicações usuais, são necessários, apenas, um número mínimo de ensaios para controle. Para aplicações em ambientes mais severos, como solo tratado com cal ou cimento, aterros ou contenção de resíduos industriais, ou para aplicações com vida útil particularmente longa, podem ser necessários ensaios especiais, incluindo ensaios de "desempenho" com parâmetros específicos do local (ISSO/TS 13434, 2008).

### **2.3.1 Agentes de degradação dos geossintéticos**

Durante o seu tempo de serviço, os geossintéticos podem estar sujeitos à ação de vários agentes de degradação físicos, químicos e biológicos. Uma exposição prolongada a estes agentes de degradação pode ter um impacto negativo em suas propriedades e, eventualmente, provocar uma redução significativa do tempo de vida útil dos materiais (CARNEIRO, 2009).

Pinto (2006) descreve os principais agentes de degradação dos materiais poliméricos como:

- **Agentes físicos:** radiação solar e outras radiações (raios  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ), temperatura e atrito mecânico intenso (danos mecânicos).
- **Agentes químicos:** água, ácidos, bases, solventes e outros agentes químicos, oxigênio, ozônio e poluentes atmosféricos.
- **Agentes biológicos:** microorganismos, tais como fungos e bactérias (AGNELLI, 1999, apud PINTO, 2006).

Os mecanismos de degradação mais comuns dos geossintéticos incluem: ação da radiação solar e outros agentes climáticos, ação da temperatura, oxidação (causada pela temperatura e radiação UV), ação de líquidos (absorção, extração de componentes, reações químicas com os polímeros) e ação de microrganismos (CARNEIRO, 2009).

O processo de degradação geralmente envolve reação com oxigênio e redução na massa molar e que os principais agentes do intemperismo são a luz solar (particularmente radiação ultravioleta), temperatura, ciclos térmicos, umidade de várias formas e vento (NICHOLSON, 2006).

### 2.3.1.1 Temperatura

Os materiais geossintéticos, em geral, não apresentam grandes problemas no tocante à temperatura, do ponto de vista da degradação. A não ser quando são submetidos à altas temperaturas de trabalho, como por exemplo, nas aplicações rodoviárias onde o geotêxtil pode ser impregnado com asfalto muito quente. A temperatura, além de ser a responsável pela ativação da oxidação, é também a responsável pela velocidade da degradação (PINTO, 2006).

A ação da temperatura (calor) pode provocar danos aos 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 dando origem a dilatação ou contração térmica dos materiais (CARNEIRO, 2009).

Quando exposto a uma fonte de calor externa, a temperatura na superfície do material polimérico aumenta, originando a quebra das ligações poliméricas. As primeiras

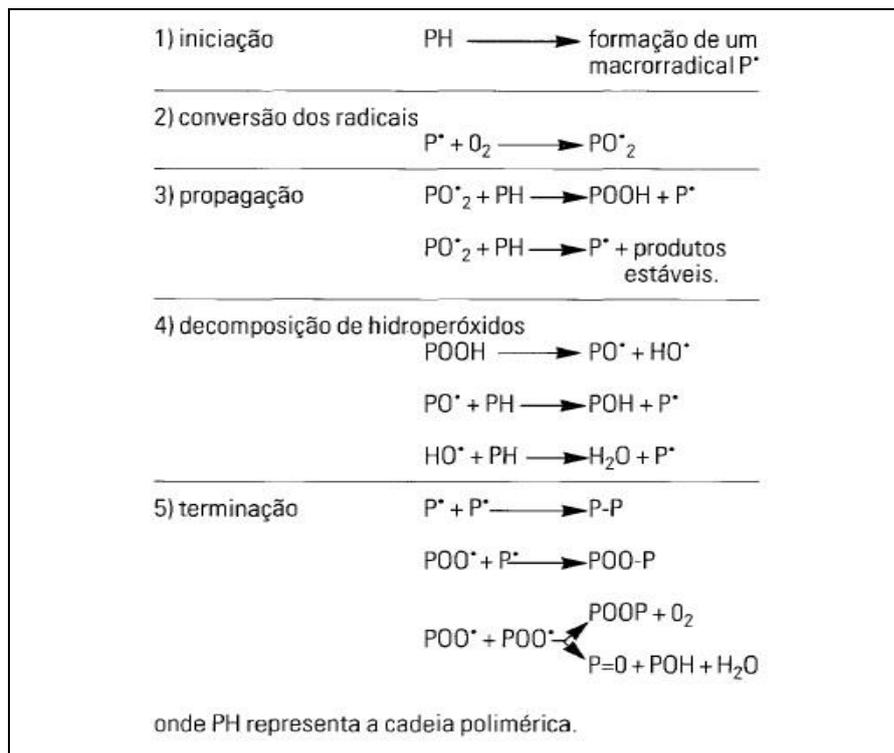
ligações a se quebrarem são as de menor energia, e liberam moléculas orgânicas inflamáveis de baixo peso molecular, também denominada como voláteis (MAIA, 2017).

A temperatura de decomposição térmica de um polímero é relacionada à presença de átomos de carbono e de outros átomos na cadeia polimérica. A degradação térmica raramente ocorre durante o uso de produtos poliméricos, todavia assume uma grande importância durante o processamento uma vez que inicia a termo-oxidação (SANTOS, 2002).

### 2.3.1.2 Termo-oxidação

A degradação por termo-oxidação é causada pelo oxigênio atmosférico ou outros oxidantes, e iniciada por processos térmicos, ocorrendo durante o uso ou, mais frequentemente, durante o processamento do polímero. Depende da presença de grupos e ligações facilmente oxidáveis na macromolécula. A oxidação ocorre na maioria das vezes em reações através de radicais livres (SANTOS, 2002). As reações básicas do processo de oxidação do polipropileno são mostradas na Figura 11.

Figura 11 – Etapas envolvidas na termo-oxidação do polipropileno.



Fonte: AGNELLI e CHINELATTO (1992, p. 28)

O processo consiste de uma etapa de iniciação onde um átomo de hidrogênio é removido da molécula do polímero promovendo a formação de um macro radical livre  $P^*$ . Os macros radicais livres  $P^*$  reagem rapidamente com o oxigênio dissolvido no polímero fundido convertendo-se em um macro radical peróxi. Este macro radical propaga a reação através da abstração de novos átomos de hidrogênio presentes em outras macromoléculas (reação intermolecular) ou nela própria (reação intramolecular), produzindo um novo macro radical que pode reagir com outras moléculas de oxigênio. A decomposição destes hidroperóxidos gera macros radicais alcóxi ( $PO^*$ ) e radicais hidróxi ( $HO^*$ ) podendo atacar outras macromoléculas e completar o ciclo das indesejáveis reações de termo-oxidação. Acima da temperatura de fusão do polímero, a mobilidade dos radicais produzidos nas diferentes etapas envolvidas na termo-oxidação é suficientemente alta para diminuir a probabilidade de se recombinarem e conseqüentemente o ciclo exposto anteriormente pode se repetir muitas vezes até que ocorra uma terminação efetiva (AGNELLI e CHINELATTO, 1992).

É um processo em que os elementos químicos perdem elétrons ao serem expostos ao oxigênio. Acontece preferencialmente na camada superficial do polímero, causando falha prematura (MOREIRA, 2017). Os efeitos da oxidação incluem normalmente alterações físicas (como a perda de brilho, transparência e o aparecimento de fissuras) e mecânicas (como a diminuição da flexibilidade e da resistência à tração) nos materiais poliméricos (CARNEIRO, 2009).

O polipropileno e o polietileno geralmente são os mais susceptíveis a sofrerem oxidação. Isso ocorre devido à presença de carbono terciário nas ramificações da cadeia polimérica, que se dá quando um átomo de carbono se liga a outros três átomos do mesmo elemento. A ligação restante, que é carbono-hidrogênio, requer então uma menor energia para dissociação do que a apresentada por carbonos primários e secundários. Dessa forma, há uma maior tendência a formação de radicais livres (MOREIRA, 2017).

### **2.3.1.3 Foto-oxidação**

A foto-oxidação ou fotodegradação é a degradação provocada pela radiação ultravioleta (PINTO, 2006). O mecanismo de fotodegradação envolve basicamente a absorção de radiação ultravioleta e reações de oxidação na sequência, provocando redução no peso molecular e alteração na estrutura química (RABELO e WHITE, 1997).

É amplamente assumido que o mecanismo clássico de foto-oxidação do polipropileno ocorre por meio de reações em cadeia via radicais livres, semelhantes à termo-oxidação. As diferenças entre os processos de foto-oxidação e termo-oxidação estão no maior caráter de auto aceleração da foto-oxidação (uma vez que os hidros peróxidos, responsáveis por esta característica, são resultados da etapa de síntese, armazenamento e processamento) e no menor número de ciclos dos radicais formados até a terminação, uma vez que, no estado sólido, a mobilidade destes radicais é muito menor e, portanto, a probabilidade de se recombinarem é maior (AGNELLI e CHINELATTO, 1992).

A energia fornecida pela radiação UV pode causar a formação de radicais livres que, em combinação com o oxigênio atmosférico, provocam a foto-oxidação dos polímeros. O processo de foto-oxidação é idêntico ao processo de termo-oxidação, com diferença apenas para a energia, que promove a formação dos radicais livres, ser fornecida pela radiação UV, e não pela temperatura (CARNEIRO, 2009).

Na maioria dos casos, os geossintéticos são expostos à radiação UV apenas durante um curto período de tempo (durante o processo de instalação), sendo posteriormente coberto por solos ou líquidos que o protegerão. No entanto, em algumas aplicações (como geobags, geotubos ou geocontêineres utilizados em esporões ou quebra-mares) eles podem ser expostos total ou parcialmente por períodos mais longos. Além disso, também pode ocorrer exposição imprevisível aos raios UV devido à remoção de areia pela ação das ondas nas águas estruturas, por exemplo (CARNEIRO; MORAIS; DE LURDES LOPES, 2018).

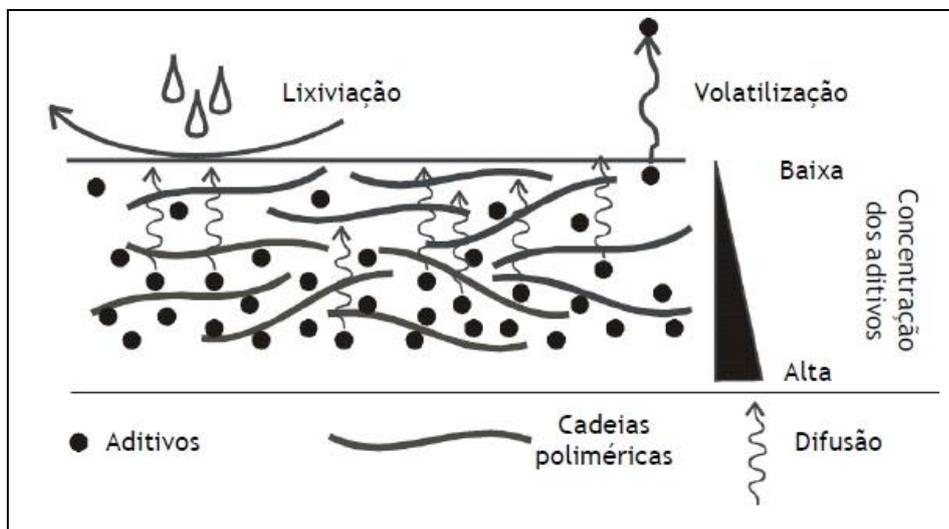
A degradação provocada pela radiação UV pode ser afetada pela temperatura, pela humidade, pela precipitação, pelo oxigênio atmosférico, pelo vento e pela poluição. A exposição prolongada à radiação UV provoca: descoloração, aparecimento de fissuras, fragilização e modificações nas propriedades mecânicas (diminuição da resistência à tração e da resistência ao impacto) dos materiais poliméricos (CARNEIRO, 2009).

A fotodegradação do polipropileno (PP) pode ser entendida como um processo heterogêneo onde, num primeiro momento, as reações por oxidação geram vários grupos químicos na estrutura molecular do PP e estes são dispostos ao acaso ao longo da cadeia polimérica. Em segundo lugar, como o PP não absorve radiação ultravioleta suficiente para causar a cisão homolítica, a iniciação da fotodegradação ocorre através de impurezas como resíduos de catalizadores e hidroperóxidos produzidos no processamento (RABELO e WHITE, 1997).

### 2.3.1.4 Ação de líquidos

O contato prolongado dos geossintéticos com líquidos pode causar a extração total ou parcial dos aditivos existentes nos geossintéticos. Os aditivos podem ser removidos da superfície dos geossintéticos por lixiviação ou por volatilização (Figura 12). Os aditivos podem ser removidos da superfície dos geossintéticos por lixiviação devido a ação da água ou de qualquer outro líquido em contato com os materiais. A extração por volatilização ocorre para alguns aditivos mais voláteis (CARNEIRO, 2009).

Figura 12 – Extração dos aditivos por lixiviação e por volatilização.



Fonte: CARNEIRO (2009, p. 52)

Outro fenômeno que pode ocorrer devido a interação dos geossintéticos com alguns líquidos é a hidrólise. A hidrólise acontece pela difusão da água absorvida pelo polímero, isto é, consiste na reação de adição de uma molécula de água a um grupo químico. A reação forma polímeros de baixo peso molecular e/ou alguns monômeros (SANTOS, 2002).

A velocidade de hidrólise é normalmente dependente da temperatura, da umidade e do pH, e ocorre mais rapidamente em meios ácidos e alcalinos. A hidrólise é também influenciada pela estrutura molecular dos polímeros (grupos característicos, grau de cristalinidade, entre outros). A hidrólise prejudica as propriedades mecânicas dos geossintéticos tornando-os mais frágeis e quebradiços (CARNEIRO, 2009).

### **2.3.1.5 Degradação química**

A degradação química consiste na quebra, devido ao contato com solventes, das interações entre as moléculas nas cadeias poliméricas. Desta forma, há aumento de espaçamento entre as moléculas o que reduz a atração e conseqüentemente aumento da deformação, gerando inchamento e amolecimento do polímero (MOREIRA, 2017).

Condições ambientais que contribuam para a degradação química, onde se incluem gases e vapores em contato com o geotêxtil, tais como oxigênio e vapor d'água, a acidez e alcalinidade presentes no solo e ainda a exposição desses materiais a raios UV e condições térmicas, podem alterar a composição química dos geossintéticos e influenciar o seu comportamento (PINTO, 2006).

### **2.3.1.6 Umidade**

Os materiais expostos ao ar livre encontram-se frequentemente molhados devido à ocorrência de condensação na sua superfície (orvalho) e à chuva. A degradação natural dos materiais poliméricos é acelerada pelo aumento da temperatura e pela existência de um alto teor de humidade. A água em si não é destrutiva, mas faz com que o oxigênio dissolvido esteja em permanente contato com os materiais, estando deste modo mais facilmente disponível para promover a oxidação. (CARNEIRO; ALMEIDA; LOPES, 2005).

### **2.3.1.7 Agentes biológicos**

Os tecidos feitos de fibras celulósicas, como o algodão por exemplo, deterioram-se rapidamente quando entram em contato com o solo em condições de umidade e temperatura propícias ao crescimento de microrganismos. Essa deterioração é causada principalmente pela ação de enzimas produzidas por fungos presentes na maioria dos solos. Por outro lado, tecidos feitos de fibras à base de polímeros sintéticos, como polietileno, polipropileno, poliamida e poliéster, geralmente são resistentes à ação desses microrganismos (COOKE e REBENFELD, 1988).

### **2.3.1.8 Outros agentes de degradação**

Há ainda outros agentes de degradação passíveis de causar danos aos geossintéticos, como: radioatividade, abrasão, ação de cargas dinâmicas e estáticas, fogo e radiação de ionização, ataque de animais, raízes e fissuração por tensão ambiental (MOREIRA, 2017).

### **2.3.1.9 Degradação por agentes combinados**

O efeito do meio é um resultado do ataque conjunto de vários elementos. Os mais importantes são: a luz ultravioleta (UV) da radiação solar, temperatura, umidade, vento, poeira e poluentes. Durante o envelhecimento natural os efeitos mais considerados são radiação ultravioleta, água e temperatura (ROSA, 1996).

A exposição à radiação UV é uma das principais fontes de degradação de materiais poliméricos, agravada pela temperatura da radiação solar, umidade, choque térmico, e outros fatores, levando a efeitos sinérgicos que degradam a cadeia polimérica (GUIMARÃES et al., 2017).

### **2.3.1.10 Degradação em ambientes costeiros**

Em ambientes marinhos os geossintéticos podem estar em contato com vários agentes de degradação, tais como: luz solar e outros agentes climatéricos, agentes biológicos, água do mar, oxigênio atmosférico ou a ação das ondas, marés e correntes (CARNEIRO; MORAIS; LOPES, 2016). Entre os fatores de degradação mais relevantes de um material em ambientes marítimos estão a abrasão, o ataque químico, a corrosão, a biodegradação, os ciclos emersão/imersão e as temperaturas extremas (DAS NEVES, 2003).

Geotêxteis podem ser imersos no oceano, colocados em zonas de maré ou expostos à luz solar. Para manter suas características pelo tempo de vida útil (pelo menos 25 anos), as propriedades de resistência e degradação dos geotêxteis em ambientes oceânicos é uma questão de extrema importância. Essas propriedades estão intimamente relacionadas à quantidade de exposição UV e a composição da água do mar (HSIEN; WANG; CHIU, 2003).

O contato prolongado com líquidos (como a água do mar) pode causar extração de aditivos químicos (como os estabilizadores) dos geossintéticos. Os líquidos também podem

interagir com as cadeias poliméricas dos geossintéticos (por exemplo, através de reações de hidrólise) ou pode ser absorvido por eles (CARNEIRO; MORAIS; DE LURDES LOPES, 2018).

A água do mar é uma solução de sais de composição quase constante, dissolvida em quantidades variáveis de água. Existem mais de 70 elementos dissolvidos na água do mar, mas apenas 6 representam 99% de todos os sais dissolvidos. Todos ocorrem como íons, como: Cloreto (55,0% em peso), Sódio (30,6% em peso), Sulfato (7,7% em peso), Magnésio (3,7% em peso), cálcio (1,2% em peso) e potássio (1,1% em peso). Oceanógrafos usam a salinidade para expressar o teor de sal da água do mar. Normalmente a água do mar tem salinidade de 35 gramas / quilograma (ou litro) de água - também expresso em 35 ‰ (HSIEN; WANG; CHIU, 2003).

Em muitas aplicações de engenharia costeira, os geossintéticos ficam expostos à radiação UV apenas durante a instalação, sendo posteriormente coberto por areia, por outros materiais de construção ou pela água do mar. Mas existem casos (como geobags, geotubos ou geocontainers usados em esporões ou quebra-mares) onde os geossintéticos podem ser expostos por períodos de tempo mais longos. Além disso, exposição UV imprevisível também pode ocorrer (por exemplo, devido à remoção de areia pela ação das ondas em estruturas enterradas) (CARNEIRO; ALMEIDA; LOPES, 2018).

O dano aos polímeros por energia solar acontece devido aos fótons que interagem com as ligações poliméricas ao longo da cadeia. Dependendo da ligação, uma frequência característica (energia de excitação) pode desassociar um elétron de sua posição original. Para cada tipo de ligação de polímero, existe um limiar crítico de fótons com energia suficiente para desalojar um elétron de sua órbita. Fótons, com comprimentos de onda mais curtos que esse limiar, podem quebrar a ligação (HSIEN; WANG; CHIU, 2003).

#### **2.4 Estudos sobre a durabilidade de geotêxteis expostos à radiação UV**

A durabilidade dos geotêxteis expostos à UV ao ar livre tem sido investigada por vários pesquisadores (Brand, Pang, 1991; Koerner, Hsuan, Koerner, 1998; Grubb et al., 2000; Hsieh, Wang, Chiu, 2006; Benjamim et al., 2007; Lodi et al., 2008; Lin, Tang, Wu, 2016; Guimarães et al., 2017; Carneiro, Morais, De Lurdes Lopes, 2018).

Brand, Pang (1991) apresentaram os resultados de um estudo realizado em 1987, a fim de obter dados da durabilidade de geotêxteis expostos às condições climáticas de Hong Kong. A exposição foi feita em ambiente onde as amostras foram submetidas a influência combinada da luz do sol, temperatura, precipitação, vento, oxigênio e poluição atmosférica. Quatorze geotêxteis foram selecionados para exposição, sendo doze não-tecidos, um tecido e um composto (com uma face tecida e outra não tecida). Os períodos de exposição ao ar livre adotados foram aproximadamente um, três, seis e nove meses. Foram realizados ensaios de tração de acordo com a ASTM D4595-86. Todos os geotêxteis perderam força e tornaram-se mais frágeis após a exposição à luz solar direta e clima. A perda de resistência à tração no primeiro mês foi relativamente pequena. As amostras de não tecidos de PET apresentaram uma perda menor que as demais. As perdas poderiam ter sido maiores se a exposição tivesse iniciado no verão, quando a intensidade da radiação é maior. O desempenho de longo prazo dos geotêxteis variou bastante, e algumas amostras perderam praticamente toda a sua força após seis meses de exposição ao ar livre.

Koerner, Hsuan, Koerner (1998) ensaiaram sete geotêxteis não tecidos expostos às intempéries em três locais diferentes tendo os resultados contrastados com os resultados de degradações em laboratório. Os ensaios ao ar livre foram realizados na Pensilvânia, Carolina do Sul e Texas, e tiveram duração de 12 meses. Os testes laboratoriais foram os métodos do arco de carbono, arco de xenônio e fluorescência UV. A exposição ao intemperismo ao ar livre foi realizada de acordo ASTM D 5970. Conjuntos de amostras foram removidas em intervalos de 1, 2, 4, 8 e 12 meses nos três locais de ensaio. As amostras que apresentaram menor perda de resistência foram as expostas na Pensilvânia, lugar com menor exposição à radiação solar. Foi observado que nenhum dos ensaios acelerados de laboratório serviu como modelos exato das condições de campo. Por isso sugeriu que ensaios acelerados devem ser considerados como ensaios de índice em vez de ensaios de desempenho.

Grubb et al. (2000) investigaram a durabilidade do geotêxtil sob condições ambientais associadas a Indústria de mineração andina, com altas altitudes, latitudes equatoriais e lixiviados aquosos, como os associados à drenagem ácida de minas ou extração alcalina. Foram feitos ensaios de exposição ao ar livre com dois geotêxteis tecidos de polipropileno com negro de fumo e dois geotêxteis não tecidos de poliéster em Huaron e Vijus no Peru, e em Atlanta, Georgia, EUA, lugares com altitude e latitude bastante diferentes. A exposição se deu por um período de 12 meses. Foram realizados ensaios de

resistência à tração (ASTM D 4632), rasgo trapezoidal (ASTM D 4533) e de punção (ASTM D 4833). O papel da latitude e da altitude na perda de resistência dos geotêxteis não ficou clara; a tendência mais forte observada foi que a perda de resistência parece ser melhor correlacionada com temperaturas máximas e mínimas. A precipitação indicou uma correlação inversa com a perda de força de geotêxteis.

Hsieh, Wang, Chiu (2006) realizaram ensaios de exposição à radiação UV ao ar livre durante 18 meses em Taiwan. Os períodos de teste foram 1 mês, 2 meses, 4 meses, 8 meses, 12 meses e 18 meses. Foram utilizados para o estudo, um geotêxtil de polipropileno preto e um geotêxtil de poliéster branco.

Foram realizados ensaios de resistência à tração (ASTM D 4632), tração em tiras (ASTM D 5035), rasgo trapezoidal (ASTM D 4533) e de punção (ASTM D 4833). Os fatores de perda de resistência devido à exposição aos raios UV e intemperismo da água do mar foram avaliados.

O estudo concluiu que a exposição aos raios UV apresenta uma fonte significativa de degradação geotêxtil. A resistência à tração final e alongamento no intervalo diminuiu como o aumento do tempo de exposição. A imersão na água do mar teve o menor efeito nas propriedades de engenharia dos geotêxteis para as condições de ensaio aplicadas. As amostras colocadas na zona das marés apresentaram perdas de resistência ligeiramente superiores aos das amostras na condição de imersão.

Benjamim et al. (2007) apresentaram a avaliação de amostras de geotêxtil tecido (PP) e não tecido (PET), submetidas a esforços de instalação e compactação (dano mecânico), e também à exposição à intempérie, principalmente à ação de raios ultravioletas, após aplicação em estruturas de contenção. O período de exposição das amostras de geotêxtil não tecido (PET) aos raios UV foi de 200 dias com elevada pluviosidade e altas temperaturas. O geotêxtil tecido (PP) ficou exposto por um período de aproximadamente 1000 dias (3 anos). Foram realizados ensaios de tração de faixa larga nos geotêxteis em ambas as direções de fábrica, segundo a NBR 12824. Com relação à degradação UV, apesar da diferença de tempos de exposição, notou-se que o geotêxtil tecido (PP) no sentido longitudinal apresentou uma resistência semelhante ao geotêxtil não tecido (PET). Entretanto, em seu sentido transversal os danos no geotêxtil tecido foram muito mais acentuados.

Lodi et al. (2008) fizeram ensaios com geotêxteis não tecidos de acordo com ASTM D1435 e D5970. As amostras foram colocadas em painel inclinado em direção ao sol. Três

geotêxteis não tecidos de poliéster (PET) foram expostos e avaliados. Os geotêxteis foram expostos por um período total de 2 meses. As propriedades físicas e de tração foram avaliadas e comparadas com material não exposto. Os testes foram realizados de acordo com as normas ABNT NBR 12568 (massa por unidade de área) e ABNT NBR 12824 (propriedades de tração). As amostras apresentaram uma redução geral na massa com a exposição. A resistência à tração apresentou uma tendência de redução com o avanço do tempo.

Lin, Tang, Wu (2016) expuseram, em campo, oito diferentes geossintéticos. Uma geogrelha, três geotêxteis tecidos diferentes e quatro geotêxteis não tecidos diferentes por até 12 meses em Taiwan. O teste de exposição ao ar livre foi realizado de acordo com a ASTM D5970. Todas as amostras foram fixadas a estruturas de madeira orientadas a 45° da horizontal. Amostras representativas foram extraídas para os tempos de exposição de 1, 2, 4, 8 e 12 meses e enviadas para o laboratório para exames adicionais de sua resistência à tração e massa por unidade de área. Com base no estudo concluíram que a geogrelha de PET apresentou pouca redução de força ao longo dos 12 meses de exposição ao sol; os valores de resistência e alongamento para todos os geotêxteis diminuíram com o tempo de exposição. A resistência dos não-tecidos apresentou uma redução maior que a dos tecidos. Os resultados do teste de exposição ao ar livre indicaram que a exposição ao sol a longo prazo, realmente prejudicou as propriedades de resistência à tração de todos os geotêxteis testados, apesar dos tipos de materiais.

Guimarães et al. (2017) ensaiaram quatro grupos de amostras de geotêxtil tecido de polipropileno. O primeiro e segundo grupos foram submetidos a uma carga de tração em conjunto com exposição ao intemperismo de campo durante 2160 h. O terceiro grupo foi exposto as mesmas condições de intemperismo sem carga de tração. O quarto grupo foi submetido a uma carga de tração no ambiente de laboratório. Mesas foram desenvolvidas para que o intemperismo e as cargas de tração atuassem simultaneamente. Os ensaios de fluência por tração em campo foram realizados em uma mesa com um ângulo semelhante à latitude do local da exposição. Foi observado que a perda de resistência à tração se tornou mais significativa quando os fatores de degradação agiram simultaneamente. O efeito de sinergia tornou-se evidente, mesmo quando o tempo de exposição e a carga de tração forem relativamente pequenos.

Carneiro, Morais, De Lurdes Lopes (2018) procederam com a avaliação da resistência de quatro geotêxteis não-tecidos agulhados de polipropileno (PP) com diferentes

composições químicas expostos à degradação em ambiente marinho. Para tal, os materiais foram expostos à ação dos agentes climáticos, imersos no oceano e expostos à ação das marés. As amostras expostas ao envelhecimento climático foram colocadas em suportes orientados para sul com inclinação de 30°. As amostras que ficaram em imersão em água do mar (aproximadamente 4 m de profundidade) foram colocadas a uma inclinação de 32.5°. As amostras ficavam totalmente imersas em praia-mar (expostas à ação da água do mar) ou totalmente emersas em baixa-mar (expostas à radiação UV e a outros agentes climáticos). Estas exposições foram realizadas no Arquipélago dos Açores e tiveram uma duração máxima de 36 meses. Os danos ocorridos no geotêxtil foram avaliados pela massa por unidade de área e através de ensaios mecânicos de tração. As exposições *in situ* a agentes de degradação presentes em ambientes marinhos provocaram alterações relevantes nas propriedades mecânicas (resistência à tração e extensão na força máxima) de um geotêxtil não-tecido. No entanto, essas alterações não foram iguais para as diferentes exposições. A exposição aos agentes climáticos originou uma redução relevante na resistência à tração do geotêxtil (diminuição para menos de metade após os 36 meses de exposição). A redução da resistência à tração foi tanto maior quanto maior o tempo de exposição. Ao contrário do que aconteceu nos testes de intemperismo ao ar, a degradação por UV dos geotêxteis não ocorreu de forma muito significativa durante a exposição à ação das marés (durante os períodos de emersão). A presença de grandes quantidades de algas e sujeira nas estruturas não-tecidas protegeu as fibras do PP contra a radiação UV (efeito *sunblind*), retardando degradação. Desta forma, o desenvolvimento de algas (e a acumulação de sujeira) nas estruturas não tecidas pode ter uma contribuição positiva para aumentar a vida útil dos geotêxteis de PP.

## **2.5 Tratamento estatístico**

Após o ensaios, a escolha da técnica estatística e das interpretações dos resultados é muito importante para que se possa tirar conclusões do estudo realizado. Um dos métodos para o tratamento estatístico dos dados é realizado por meio da construção de intervalos de confiança. A ferramenta estatística utilizada é descrita a seguir.

### 2.5.1 Intervalo de confiança

Um intervalo de confiança estimado de um parâmetro é o intervalo entre duas estatísticas que inclui o valor verdadeiro do parâmetro, com alguma probabilidade. O intervalo de confiança da média é um dos mais comuns cálculos estatísticos. Ele representa o intervalo, com uma determinada probabilidade, onde a média verdadeira de uma população está contida. O intervalo de confiança da média dependerá do número de observações, do desvio padrão e do nível de confiança desejado (BORGES, 2006).

Nos casos em que a distribuição de  $\bar{x}$  na amostragem é normal, pode-se esperar que a média da população  $\mu$  se encontre nos intervalos de confiança (IC)  $(\bar{x} \pm \sigma)$ . Os números extremos desses intervalos são denominados limites de confiança. A percentagem de confiança  $c$  é frequentemente denominada nível de confiança e a probabilidade complementar  $\alpha$  é designada por nível de significância ou “risco” sendo que  $c=1-\alpha$ . Quando a distribuição de  $\bar{x}$  na amostragem é normal, é possível calcular a probabilidade da média populacional  $\mu$  ocorrer entre dois valores da distribuição, recorrendo à transformação associada com a Distribuição Normal Reduzida,  $Z$ . Conhecendo-se a variabilidade populacional  $\sigma$  e aplicando a transformação  $Z$  à média na Amostragem, têm-se a Equação 2.1 (ESTEVES, 2007).

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)} \quad (2.1)$$

Ainda, segundo Esteves (2007), se o desvio-padrão da população  $\sigma$  não é conhecido, pode-se utilizar  $\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)$  como estimador sem-vício de  $\left(\sigma/\sqrt{n}\right)$  e a transformação de  $t$  para  $v = n - 1$  graus de liberdade. Têm-se a Equação 2.2.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)} \quad (2.2)$$

E o intervalo de confiança de  $\mu$  (Equação 2.3).

$$\bar{x} - t_{[n-1, \frac{\alpha}{2}]} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{[n-1, \frac{\alpha}{2}]} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

Para obter o valor  $t$  da distribuição *t de Student*, basta calcular os graus de liberdade ( $gl = n - 1$ ) e fixar o nível de confiança (normalmente 95%) (BORGES, 2006).

Neste trabalho, os intervalos de confiança foram construídos a partir da distribuição *t de Student*, uma vez que não se conhece o valor do desvio padrão populacional ( $\sigma$ ) e são amostragens com  $n \leq 30$ . Para encontrar o valor crítico  $t_{[n-1, \frac{\alpha}{2}]}$  correspondente ao nível de confiança desejado a partir do grau de liberdade ( $n - 1$ ), utilizou-se a Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela simplificada dos valores  $t$  de *Student*.

grau de liberdade (n-1)	Nível de Confiança								
	50%	80%	90%	95%	98%	99%	99,5%	99,8%	99,9%
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
$\infty$	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

Fonte: Adaptado de BARBETTA (2002, p. 325).

Quando dispomos de uma amostra pequena (digamos,  $n < 30$ ), não temos a garantia de que a distribuição amostral da média se aproxime de uma distribuição normal. Porém, se a variável em estudo tiver uma distribuição razoavelmente simétrica, parecida com uma normal, a teoria estatística mostra que é possível construir estimativas intervalares para a média populacional, utilizando uma certa distribuição, denominada de *t de Student* (BARBETTA, 2002).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o material estudado, no caso um geotêxtil tecido de polipropileno, e é feita a análise de sua durabilidade, antes e após exposição à degradação por agentes do ambiente costeiro em campo. O material intacto foi caracterizado pelos ensaios de massa por unidade de área e tração nominal.

Os ensaios de resistência à tração das amostras pós exposição aos fatores de degradação servem para analisar o efeito da degradação quando comparados aos resultados de resistência à tração do material virgem.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração foram avaliados por análises estatísticas, utilizando intervalos de confiança (IC) para inferência estatística, com a finalidade de estudar generalizações sobre uma população através de evidências fornecidas por uma amostra.

#### 3.1 Material estudado

Os material utilizado no desenvolvimento dessa pesquisa foi o geotêxtil tecido StrataTex W5050<sup>®</sup>, cujas as características técnicas encontram-se detalhadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Características técnicas do Geotêxtil Tecido: StrataTex W5050<sup>®</sup>.

<b>Propriedades Mecânicas</b>			
Resistência nominal Longitudinal (MD), TN	ABNT NBR ISO 10319	kN/m	50
Resistência nominal Transversal (CD), TN	ABNT NBR ISO 10319	kN/m	50
Resistência ao rasgo trapezoidal	ASTM D 4533	kN	0,50
Resistência ao puncionamento	ABNT NBR 3359	kN	5,0
<b>Propriedades Hidráulicas</b>			
Permissividade	ASTM D 4491	1/s	0,02
Abertura de filtração (95)	AFNOR G 38017	mm	100
<b>Propriedades Geométricas</b>			
Dimensão das bobinas	Largura x Comprimento	m	3,80 x 200
Área	---	m <sup>2</sup>	760

Fonte: Geo Soluções<sup>2</sup> (2020).

<sup>2</sup> Documento eletrônico não paginado

### 3.1.1 Amostras e corpos de prova

A obtenção das amostras e a preparação dos corpos de prova foram feitas de acordo com a ABNT NBR ISO 9862 (2013): "Amostragem e preparação de corpos de prova de geotêxteis - Procedimentos". Os corpos de prova foram extraídos de posições uniformemente distribuídas por toda a largura e comprimento da bobina e os 100 mm externos de cada borda foram desprezados.

#### 3.1.1.1 Corpos de prova para ensaios de massa por unidade de área

Foram marcados dez corpos de prova de tamanho 10cm x 10cm, utilizando um gabarito de acrílico, e depois cortados conforme a norma ABNT NBR ISO 9864 (2013) "Geossintéticos – Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos" (Figura 13).

Figura 13 – Corpos de prova para ensaios de massa por unidade de área .



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

### 3.1.1.2 Corpos de prova para ensaios de tração nominal

A preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração nominal foi feita conforme a norma ASTM 5035:11 (2019) "*Standard Practice for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics - Strip Method*". Foram preparados dez corpos de prova no sentido longitudinal e dez no sentido transversal. Esses corpos de prova foram cortados com dimensões 5cm x 50cm.

### 3.1.1.3 Corpos de prova para exposição em campo

Para os ensaios de exposição em campo, foram marcados e posteriormente cortados com tesoura para tecido, corpos de prova com dimensões 35cm x 60cm. Neste trabalho foram expostos corpos de prova apenas para ensaios de tração nominal no sentido transversal.

## 3.1.2 Ensaios de caracterização

Foram realizados ensaios de massa por unidade de área e resistência à tração nominal.

### 3.1.2.1 Massa por unidade de área

A massa por unidade de área ou gramatura ( $\mu A$ ) é definida como sendo a massa do produto por unidade de área, geralmente expressa em gramas por metro quadrado ( $g/m^2$ ). A propriedade foi determinada conforme a norma ABNT NBR ISO 9864 (2013) (Geossintéticos – Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos). Os corpos de prova apresentavam área aproximada de 100  $cm^2$  e foram pesados em balança digital com precisão de 0,01g. A massa por unidade de área ( $\mu A$ ) em  $g/m^2$  dos corpos de prova foi calculada por meio da Equação 3.1.

$$\mu A = \frac{m * 10000}{A} \quad (3.1)$$

Onde  $m$  é a massa do corpo de prova, expresso em gramas, e  $A$  é a área em centímetros quadrados. O resultado apresenta o valor médio das massas por unidade de área, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

### 3.1.2.2 Resistência nominal à tração

No presente trabalho foi realizado o ensaio de tração em faixa estreita segundo a norma ASTM D5035:11 (2019) - "*Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)*". Os ensaios foram realizados no laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Para o ensaio de tração em faixa estreita, os corpos de prova são preparados com 5 cm de largura e fixados a uma distância entre de 7,5 cm entre os mordentes do equipamento. A velocidade de tração no ensaio é de 300 mm/min (Figura 14).

Figura 14 – Ensaio de Tração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

### 3.1.3 Exposição em campo

Os ensaios de exposição dos geotêxteis a agentes climáticos em campo foram realizados na cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte. Situada a 30 metros de altitude, Natal tem as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 5° 47' 42" Sul, Longitude: 35° 12' 34" Oeste. O local da exposição foi o Departamento de Oceanografia e Limnologia da UFRN (Figura 15), num ambiente sem a presença de sombras e com fácil acesso à praia (Figura 16).

Figura 15 – Local de Exposição (Mapa).



Fonte: Google Earth (acesso em 07. Nov. 2020)

Esses ensaios foram realizados com base nas normas ASTM D5970/D5970M:16 “*Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure*” e ASTM

D1435:2013 “Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics”. Os corpos de prova forma expostos em quatro condições distintas.

Figura 16 – Local de Exposição (Foto).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

### 3.1.3.1. Exposição ao ar livre sobre pórtico de madeira

Para a realização da pesquisa foi confeccionada uma mesa de madeira com tampo em madeirite plastificado. A inclinação da mesa foi de  $6^\circ$  valor aproximado da latitude local ( $5^\circ 47' 42''$ ). A Figura 17 mostra o pórtico confeccionado.

Figura 17 – Exposição ao ar livre sobre pórtico de madeira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

### 3.1.3.2 Exposição ao ar livre sobre areia

A exposição foi feita em caixa de PVC, de dimensões 40cm x 75cm, foram expostos corpos de prova sobre areia coletada da praia. A fixação se deu em cima de uma trama feita com fios de náilon (Figura 18).

Figura 18 – Exposição ao ar livre sobre areia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Legenda: (A) Caixa de PVC com areia; (B) Corpo de prova sobre a areia.

### 3.1.3.3 Exposição sobre areia e imersos em água do mar

Foram expostos corpos de prova sobre areia coletada da praia e imersos em água do mar, presos sobre uma trama feita com fios de náilon em uma caixa de PVC (Figura 19).

Figura 19 – Exposição sobre areia e imersos em água do mar.



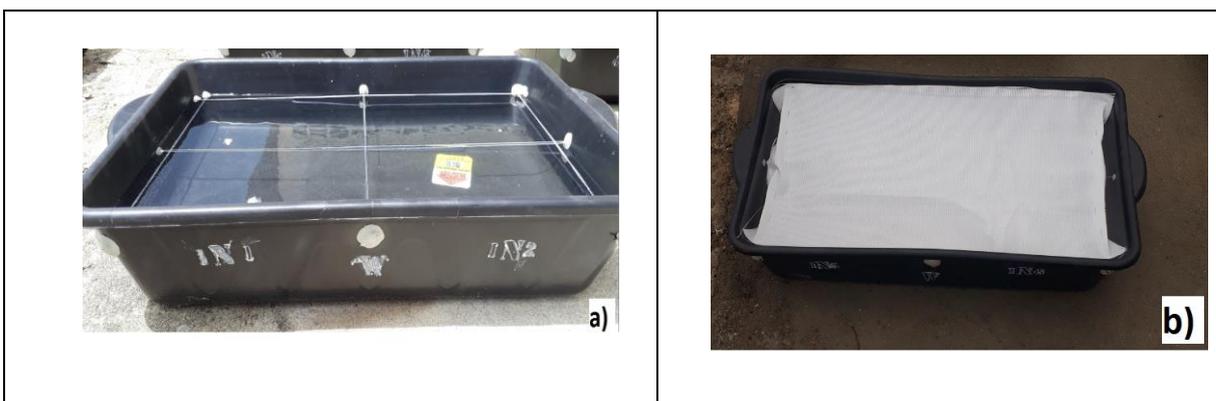
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Legenda: (A) Caixa de PVC com areia e água do mar; (B) Corpo de prova sobre a areia e imerso em água do mar.

### 3.1.3.4 Exposição de corpos de prova imersos em água do mar

Foram expostos corpos de prova imersos em água do mar, presos sobre uma trama feita com fios de náilon em uma caixa de PVC (Figura 20).

Figura 20 – Exposição de corpos de prova imersos em água do mar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Legenda: (A) Caixa de PVC com água do mar; (B) Corpo de prova imerso em água do mar.

Ferreira (2019) caracterizou a água do mar da Via Costeira por meio de análise feita em laboratório, conforme apresentado no Quadro 10.

Quadro 10 – Análise da água do mar coletada na Via Costeira de Natal/RN.

Parâmetros	Resultados
pH	7,00
Condutividade elétrica, $\mu\text{s}/\text{cm}$ a 25°C	56.700,00
Alcalinidade total, $\text{mg}/\text{LCaCO}_3$	116,28
Dureza total, $\text{mg}/\text{L}$	7.045,06
Amônia, $\text{mg}/\text{L}$ $\text{NH}_3$	0,20
Nitrito, $\text{mg}/\text{L}$ de N	<0,01
Nitrato, $\text{mg}/\text{L}$ de N	0,53
Cálcio, $\text{mg}/\text{L}$ de $\text{Ca}^+$	463,61
Magnésio, $\text{mg}/\text{L}$ de Mg	1.423,78
Salinidade, ‰	37,80
Fosfato, $\text{mg}/\text{L}$ de P	0,01

Fonte: Ferreira (2019).

As amostras de geotêxtil ficaram expostas em três períodos diferentes (29, 58 e 90 dias) e expostas a três níveis distintos de radiação ultravioleta acumulada. O acompanhamento das condições climáticas locais se deu a partir de dados fornecidos pela estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Após cada período de exposição, as amostras foram coletadas e foram extraídos corpos de prova para ensaios de tração residual, com a finalidade de avaliar degradação em cada período e para cada situação distinta de exposição. A Tabela 3 apresenta os códigos e o resumo dos dados dos grupos e subgrupos adotados.

Tabela 3 – Identificação dos grupos e subgrupos de amostras.

Grupo	Tipo de Amostra	Subgrupo	Tempo de Exposição (dias)	Nº de CP's
G 0	Virgem	G 0	0	10
G T	Exposição sobre mesa de madeira	G T1	29	6
		G T2	58	6
		G T3	90	6
GS	Exposição sobre Areia	G S1	29	6
		G S2	58	6
		G S3	90	6
G SW	Exposição sobre Areia imerso em água do mar	G SW1	29	6
		G SW2	58	6
		G SW3	90	6
G W	Exposição imerso em água do mar	G W1	29	6
		G W2	58	6
		G W3	90	6

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Além disso, com o auxílio de um termômetro de infravermelho (Figura 21), foram feitas semanalmente, em horários distintos, medições de temperatura na superfície das amostras, com a finalidade de comparação da amplitude térmica medida para o ambiente e para as amostras.

Figura 21 – Medição da temperatura na superfície do geotêxtil exposto em campo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

### **3.2 Ensaio para avaliação da degradação**

Após o período de exposição em campo, os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos de resistência à tração residual. Foi adotado o mesmo método utilizado para os ensaios de resistência à tração nominal, ou seja, o ensaio de tração em faixa estreita (ASTM D5035:11, 2019).

### **3.3 Análise dos resultados**

A degradação dos corpos de prova expostos em campo, para cada período de exposição, foi avaliada por meio de inferência estatística e definição de Intervalos de confiança. A ferramenta de auxílio utilizada foi o programa *Microsoft Excel*<sup>®</sup>.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do geotêxtil

A caracterização física do geotêxtil foi feita analisando o quesito massa por unidade de área. A Tabela 4 apresenta o resultado obtido. Para dados completos, vide Apêndice A.

Tabela 4 – Caracterização física do geotêxtil.

Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	
Valor médio	271,26
Desvio Padrão	2,66
Coefficiente de Variação (CV)	0,98

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na caracterização mecânica foi avaliado a resistência à tração nominal. A Tabela 5 mostra os resultados estatísticos da resistência à tração, obtidos dos ensaios de tração realizados com as amostras virgens no sentido transversal.

Tabela 5 – Resultados estatísticos de resistência à tração das amostras virgens no sentido transversal.

Parâmetro	Valor
Valor médio amostral (kN/m)	53,69
Valor máximo (kN/m)	57,66
Valor mínimo (kN/m)	46,66
Desvio padrão (kN/m)	3,87
Coefficiente de variação (%)	7,21
Intervalo de confiança (kN/m)	$50,92 \leq \mu \leq 56,46$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O valor médio de resistência à tração encontrado para o sentido transversal (53,69 kN/m) foi ligeiramente maior que informado pelo fornecedor do produto (50,00 kN/m). A Tabela 6 mostra os resultados estatísticos de deformação no colapso, obtidos dos ensaios de tração realizados com as amostras virgens no sentido transversal.

Tabela 6 – Resultados estatísticos de deformação no colapso das amostras virgens no sentido transversal.

Parâmetro	Valor
Valor médio amostral (%)	21,26
Valor máximo (%)	24,20
Valor mínimo (%)	17,03
Desvio padrão (%)	1,94
Coefficiente de variação (%)	9,13
Intervalo de confiança (%)	$19,87 \leq \mu \leq 22,65$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

As Tabela 7 mostra os resultados estatísticos da resistência à tração, obtidos dos ensaios de tração realizados com as amostras virgens no sentido longitudinal. A Tabela 8 mostra os resultados da deformação no colapso para as amostras virgens no sentido longitudinal.

Tabela 7 – Resultados estatísticos de resistência à tração das amostras virgens no sentido longitudinal.

Parâmetro	Valor
Valor médio amostral (kN/m)	48,09
Valor máximo (kN/m)	53,91
Valor mínimo (kN/m)	44,25
Desvio padrão (kN/m)	2,95
Coefficiente de variação (%)	6,13
Intervalo de confiança (kN/m)	$45,99 \leq \mu \leq 50,20$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 8 – Resultados estatísticos de deformação no colapso das amostras virgens no sentido longitudinal.

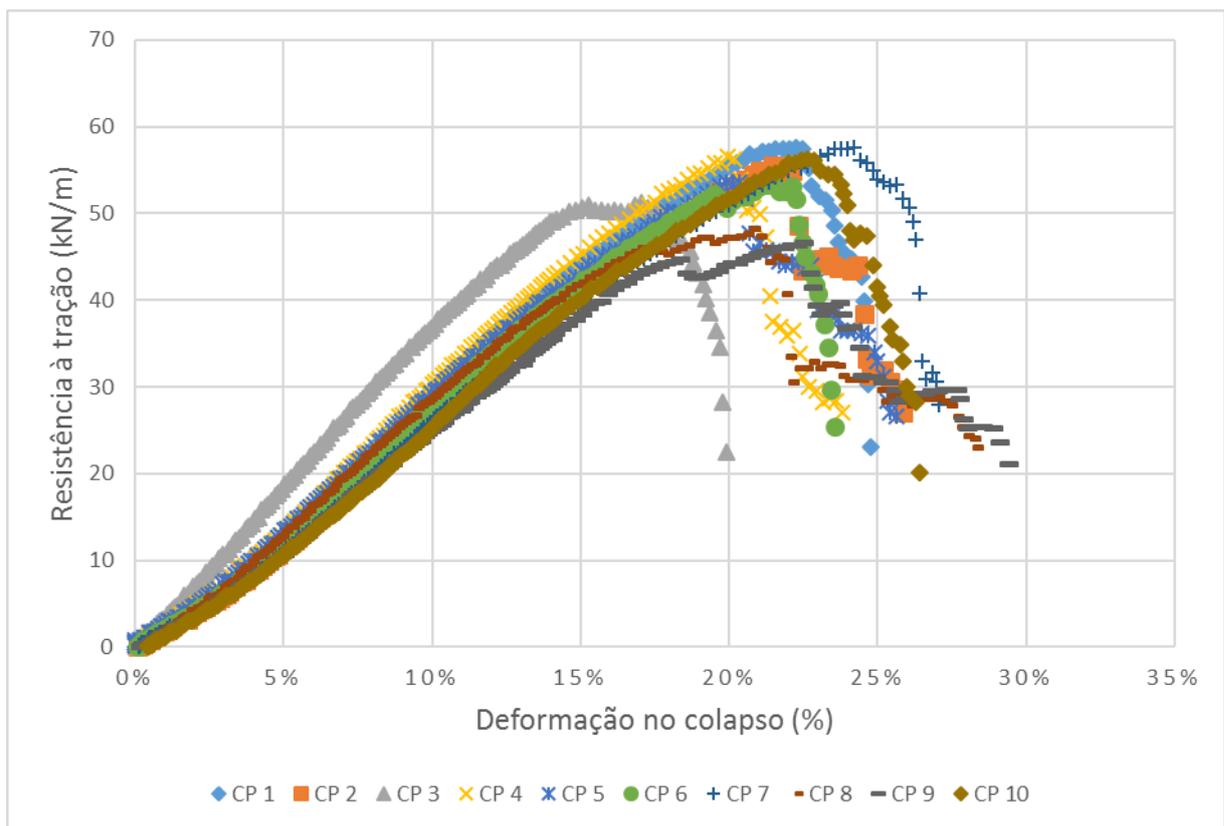
Parâmetro	Valor
Valor médio amostral (%)	10,92
Valor máximo (%)	12,09
Valor mínimo (%)	9,93
Desvio padrão (%)	0,72
Coefficiente de variação (%)	6,60
Intervalo de confiança (%)	$10,40 \leq \mu \leq 11,43$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O valor médio de resistência à tração encontrado para o sentido longitudinal (48,09 kN/m) foi ligeiramente menor que informado pelo fornecedor do produto (50,00 kN/m), todavia o Intervalo de Confiança calculado contempla o valor do fornecedor.

O Gráfico 1 ilustra o comportamento das curvas durante o ensaio de tração, para os diversos corpos de prova, no sentido transversal.

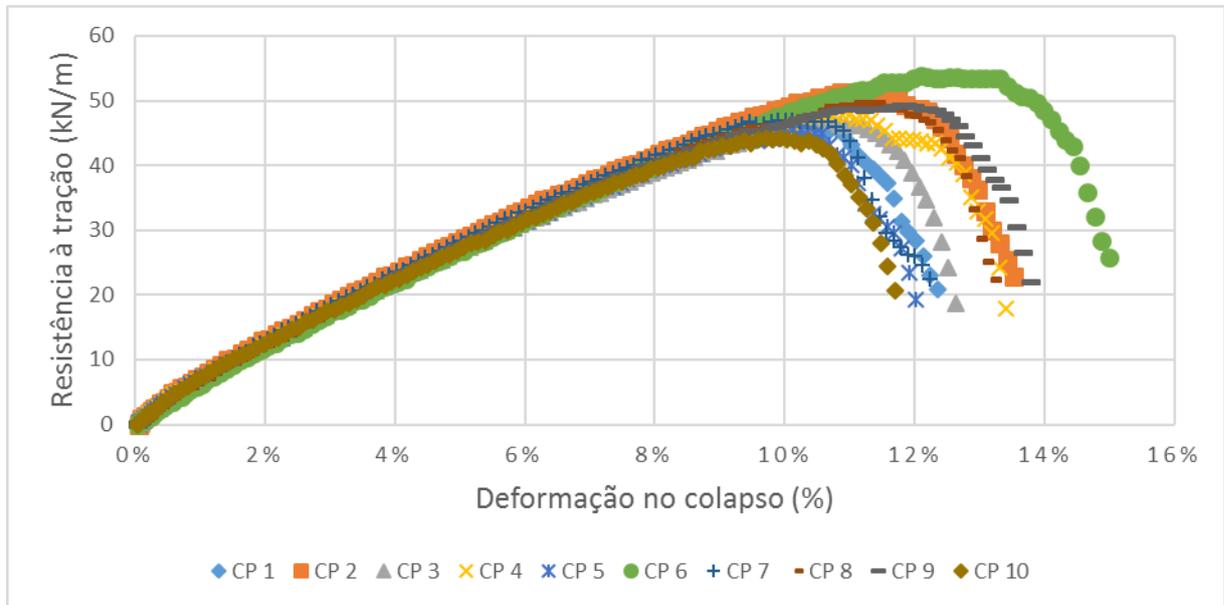
Gráfico 1 – Resistência à Tração – Sentido Transversal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O Gráficos 2 ilustra o comportamento das curvas durante o ensaio de tração, para os diversos corpos de prova, no sentido longitudinal.

Gráfico 2 – Resistência à Tração – Sentido Longitudinal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para a realização dos ensaios propostos nesta pesquisa, adotou-se o sentido transversal.

## 4.2 Exposição em Campo

O geotêxtil ficou expostos em três períodos diferentes. Na Tabela 9 é possível ver um resumo dos principais dados climáticos obtidos durante os períodos de exposição, monitorados com a estação meteorológica do INMET. Para dados completos, vide Apêndice B.

Tabela 9 – Principais dados climáticos obtidos durante os períodos de exposição.

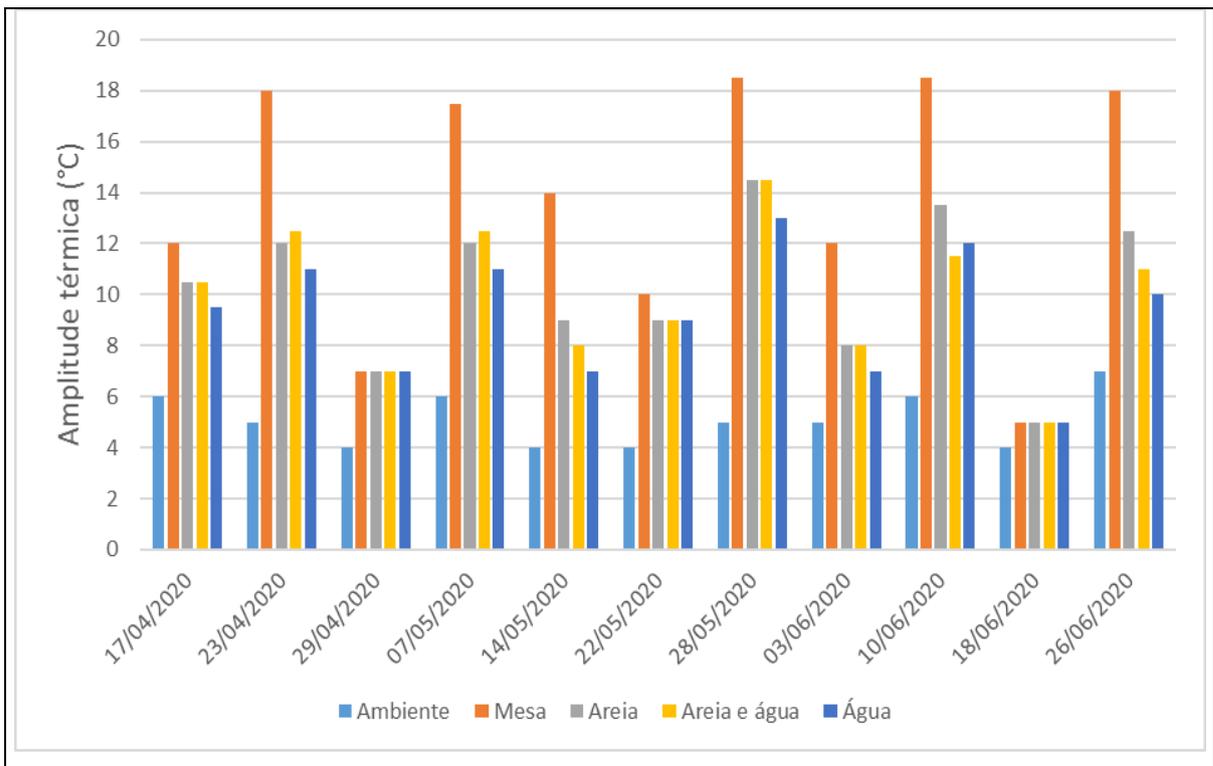
Período	Data	Umidade relativa média (%)	Radiação máxima diária acumulada (MJ/m <sup>2</sup> )	Radiação Global acumulada (kJ/m <sup>2</sup> )	Precipitação acumulada (mm)
1°	31/mar a 29/abr	83,16	91,10	596.752,30	284,00
2°	31/mar a 28/maio	84,34	163,50	1.074.699,70	694,60
3°	31/mar a 29/jun	84,25	242,56	1.586.003,10	1.018,80

Fonte: INMET<sup>3</sup> (2020).

<sup>3</sup> Documento eletrônico não paginado.

O gráfico 3 mostra a diferença entre a amplitude térmica local e a amplitude térmica verificada para as amostras. É possível observar que a amplitude térmica do ambiente não passa de 7°C, enquanto para as amostras facilmente passavam de 10°C. As maiores amplitudes foram observadas para as amostras expostas sobre a mesa, chegando a 18,5°C. As menores amplitudes foram observadas nas amostras expostas em imersão em água do mar, com amplitude térmica média de aproximadamente 9,0°C.

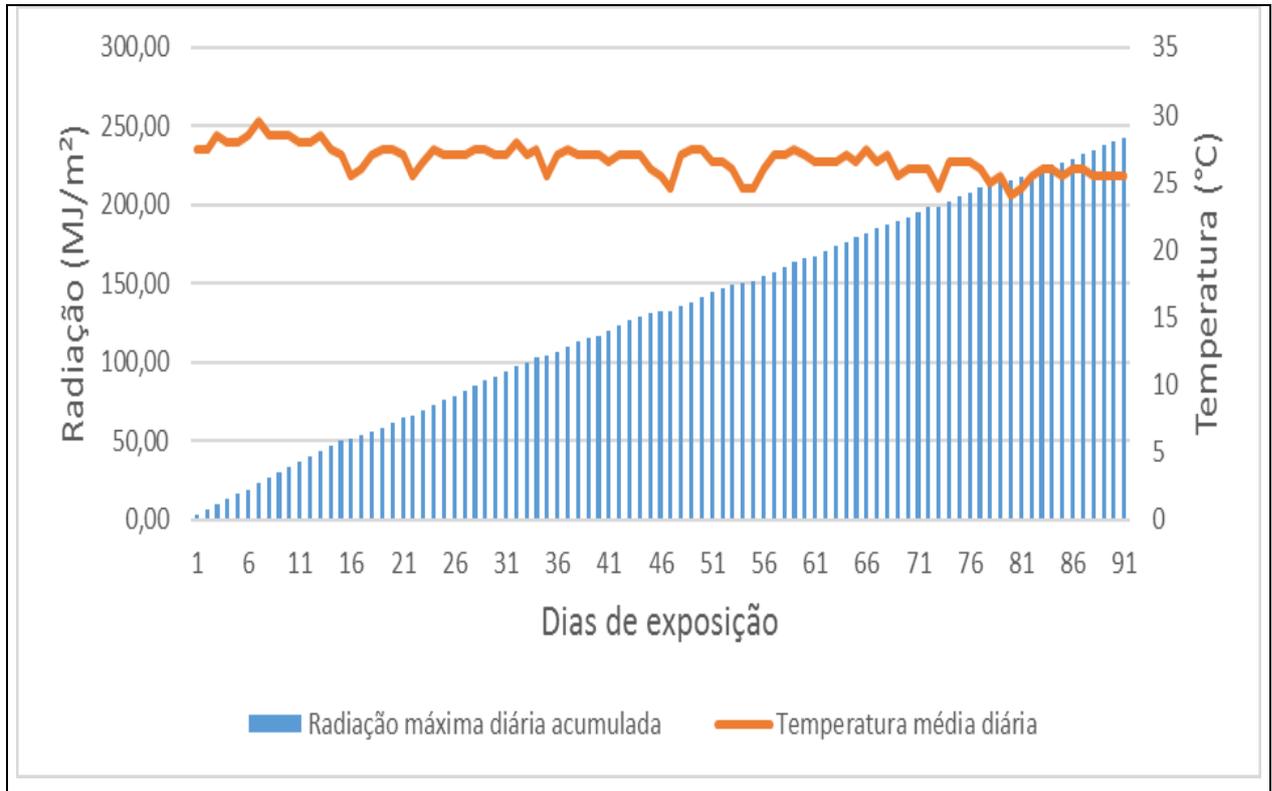
Gráfico 3 – Amplitude térmica no ambiente x Amplitude térmica das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O gráfico 4 mostra os valores acumulados de radiação máxima diária e a temperatura média diária às quais as amostras foram submetidas. Durante o período em que ficaram expostas, as amostras receberam um total de 242,56 MJ/m<sup>2</sup> de radiação máxima diária acumulada e estiveram submetidas a temperaturas ambiente variando de 22 a 31°C.

Gráfico 4 – Temperatura média diária e radiação máxima diária acumulada.

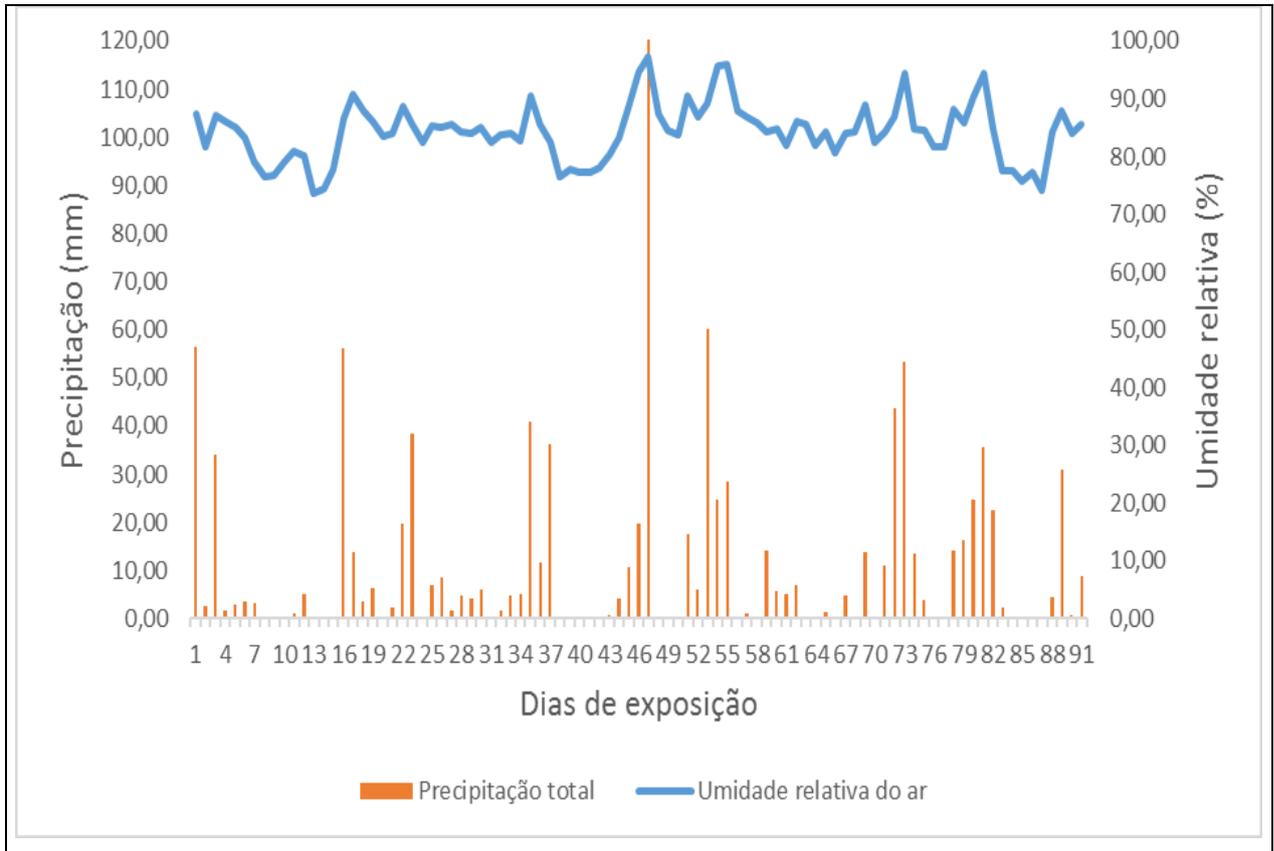


Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

As temperaturas se mantiveram relativamente altas e seria uma causa provável de danos na estrutura polimérica devido a ação catalítica da temperatura que acelera os mecanismos de degradação, causando a dissociação das ligações químicas e promovendo a formação de radicais livres e iniciando a oxidação do polímero.

O Gráfico 5 apresenta os valores de precipitação e umidade relativa diários às quais as amostras também estiveram submetidas durante os 90 dias de exposição. É possível observar que a umidade relativa do ar se mantém alta, mesmo nos dias com baixa precipitação.

Gráfico 5 – Umidade relativa do ar e precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O material ficou muito tempo em contato com a água proveniente das chuvas constantes ou imersos todo o tempo em água do mar, e essa exposição pode promover a perda de parte dos aditivos presentes na amostra. A água ainda pode contribuir para acelerar a degradação, promovendo a hidrólise, ou fazendo com que o oxigênio dissolvido permaneça em contato com as amostras, causando a oxidação.

#### 4.2.1 Resultados dos ensaios de tração pós-exposição em campo

Na Tabela 10 pode-se ver os resultados de resistência à tração obtidos nos ensaios de tração faixa estreita para os subgrupos nos diversos períodos de exposição.

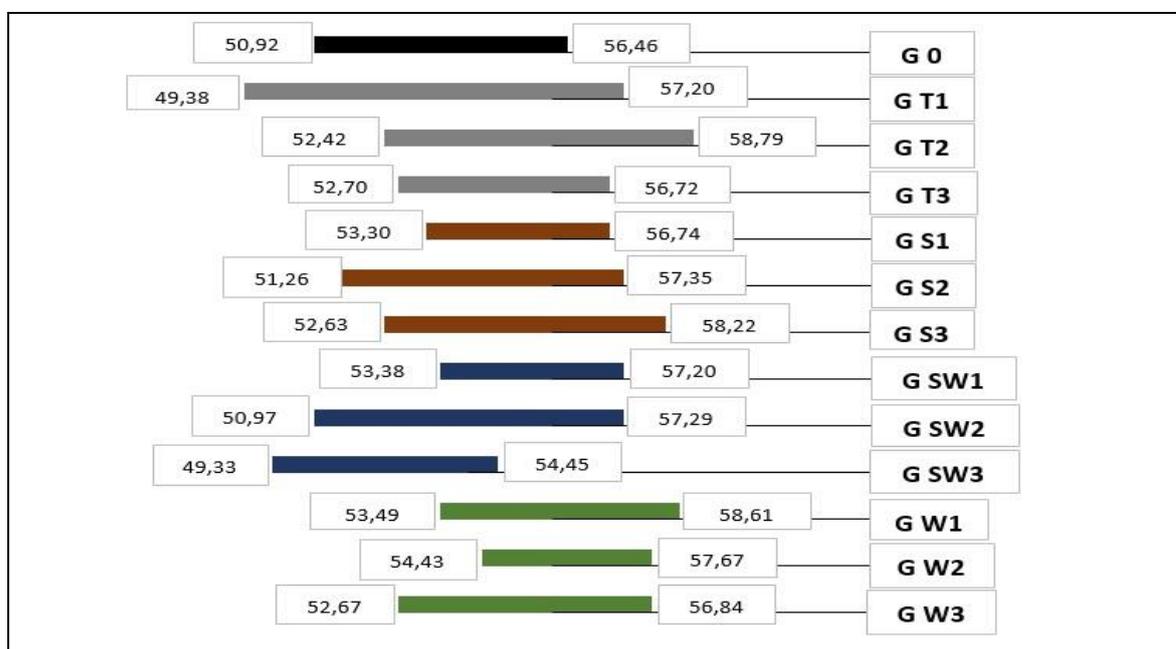
Tabela 10 – Resultados de resistência à tração das amostras virgens no sentido transversal.

Subgrupo	Resistência (kN/m)	Desvio Padrão (kN/m)	Coefficiente de Variação (%)	Intervalo de Confiança (95%) (kN/m)
G0	53,69	3,87	7,21	$50,92 \leq \mu \leq 56,46$
GT 1	53,19	3,63	12,94	$49,38 \leq \mu \leq 57,20$
GT 2	55,60	3,03	5,45	$52,42 \leq \mu \leq 58,79$
GT 3	54,71	1,92	3,51	$52,70 \leq \mu \leq 56,72$
GS 1	55,02	1,64	2,98	$53,30 \leq \mu \leq 56,74$
GS 2	54,31	2,90	5,34	$51,26 \leq \mu \leq 57,35$
GS 3	55,43	2,66	4,81	$52,63 \leq \mu \leq 58,22$
GSW 1	55,29	1,82	3,30	$53,38 \leq \mu \leq 57,20$
GSW 2	54,13	3,01	5,56	$50,97 \leq \mu \leq 57,29$
GSW 3	51,89	2,44	4,70	$49,33 \leq \mu \leq 54,45$
GW 1	56,05	2,44	4,35	$53,49 \leq \mu \leq 58,61$
GW 2	56,05	1,55	2,76	$54,43 \leq \mu \leq 57,67$
GW 3	54,76	1,99	3,63	$52,67 \leq \mu \leq 56,84$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Figura 22 mostra uma representação dos intervalos de confiança para o parâmetro de resistência à tração para todos os subgrupos de amostras.

Figura 22 – Intervalo de confiança para o parâmetro de resistência à tração (kN/m).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando o gráfico, é possível afirmar com 95% de confiança que as médias amostrais do material virgem interceptam os intervalos de confiança do geotêxtil exposto. Ou seja, as médias amostrais do material exposto e do material virgem não divergem entre si, sugerindo que não ocorreu a degradação do geotêxtil exposto durante o período do estudo. Outro aspecto a ser observado é que nenhum meio de exposição se destaca influenciando de forma significativa na degradação do geotêxtil.

Na Tabela 11 pode-se ver os resultados de deformação no colapso obtidos nos ensaios de tração faixa estreita para os subgrupos nos diversos períodos de exposição.

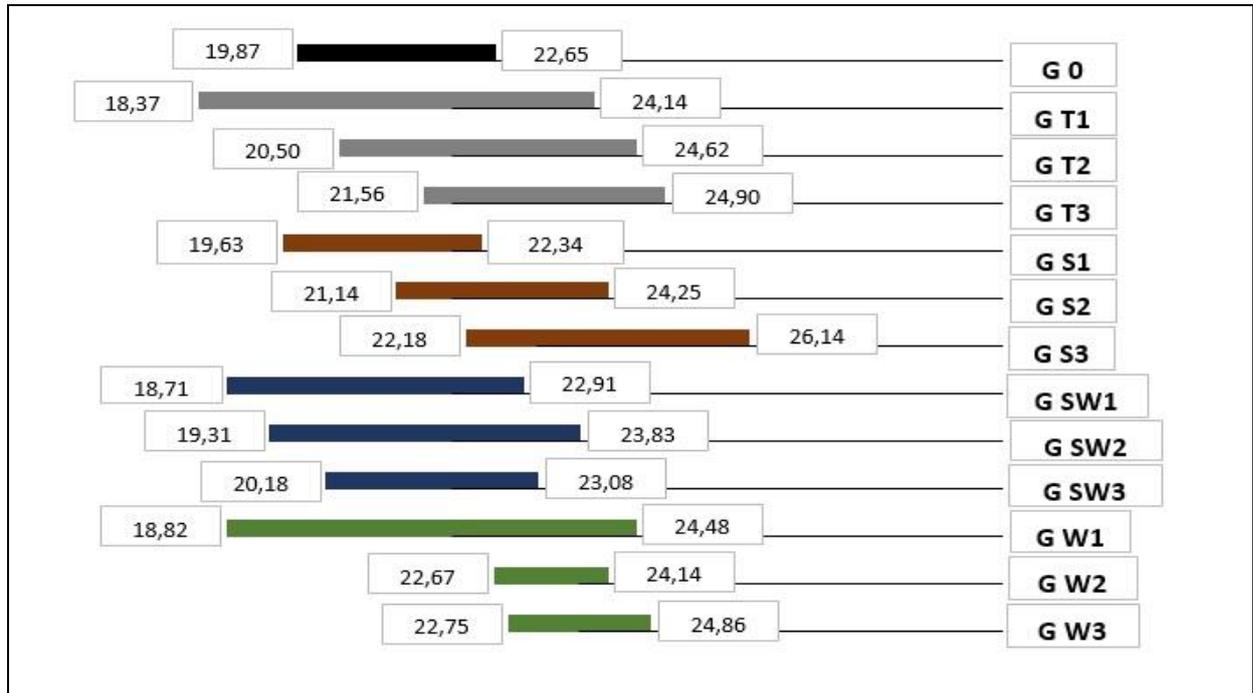
Tabela 11 – Resultados de deformação das amostras virgens no sentido transversal.

Subgrupo	Deformação no colapso (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)	Intervalo de Confiança (95%) (kN/m)
G0	21,26	1,94	9,13	$19,87 \leq \mu \leq 22,65$
GT 1	21,25	2,75	12,94	$18,37 \leq \mu \leq 24,14$
GT 2	22,56	1,96	8,70	$20,50 \leq \mu \leq 24,62$
GT 3	23,23	1,59	6,83	$21,56 \leq \mu \leq 24,90$
GS 1	20,85	1,42	6,80	$19,36 \leq \mu \leq 22,34$
GS 2	22,69	2,90	6,52	$21,14 \leq \mu \leq 24,25$
GS 3	24,16	1,89	7,82	$22,18 \leq \mu \leq 26,14$
GSW 1	20,81	2,00	9,62	$18,71 \leq \mu \leq 22,91$
GSW 2	21,57	2,15	9,98	$19,31 \leq \mu \leq 23,83$
GSW 3	21,63	1,38	6,38	$20,18 \leq \mu \leq 23,08$
GW 1	21,65	2,70	12,46	$18,82 \leq \mu \leq 24,48$
GW 2	24,58	1,82	7,39	$22,67 \leq \mu \leq 24,14$
GW 3	23,81	1,00	4,21	$22,75 \leq \mu \leq 24,86$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A Figura 23 mostra uma representação dos intervalos de confiança para o parâmetro de deformação no colapso para todos os subgrupos de amostras.

Figura 23 – Intervalo de confiança para o parâmetro de deformação no colapso (%).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Os resultados de deformação no colapso também não divergiram entre si, exceto para os dois últimos períodos de exposição em imersão em água do mar (G W2 e G W3), uma vez que seus intervalos não interceptam o intervalo da amostra virgem (G 0).

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente estudo teve como objetivo avaliar a degradação de amostras de geotêxtil tecido de polipropileno exposto ao intemperismo costeiro em Natal/RN durante um período de noventa dias. Para analisar os efeitos do intemperismo, as amostras foram expostas em quatro meios distintos, a saber: sobre uma mesa de madeira, sobre areia, sobre areia e imersão em água do mar, e imerso em água do mar simplesmente. Após exposição, as amostras foram submetidas a ensaios de tração faixa-estreita com a finalidade de verificar sua resistência à tração e sua deformação na ruptura.

A partir dos resultados dos ensaios de tração, foi possível definir intervalos de confiança, utilizando inferência estatística, para os parâmetros de resistência à tração e deformação no colapso.

Após a análise dos intervalos é possível afirmar com 95% de confiança que o material não sofreu degradação significativa durante o período de exposição. Além disso, não se percebeu diferença de degradação nos meios de exposição, uma vez que em todos os meios o comportamento do material foi semelhante.

Como o material estudado não apresentou sinais de degradação durante o período de exposição, é possível entender que este geotêxtil pode ser um excelente insumo para construções provisórias, obras que requerem tempos de vida útil mais curtos e nas quais os materiais não necessitam de proteção, uma vez que, sem proteção alguma, o material apresentou excelente resistência a degradação por ação UV.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Além de um período mais longo de exposição, uma outra sugestão para pesquisas futuras é avaliar, para as situações abordadas neste trabalho, o comportamento de geotêxteis com e sem aditivos antioxidantes, afim de comparar a degradação causada nas duas situações.

## REFERÊNCIAS

- AGNELLI, José Augusto M.; CHINELATTO, M. A. **Degradação de polipropileno: Aspectos teóricos e recentes avanços em sua estabilização.** Polímeros: Ciência e Tecnologia. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10318-1: geossintéticos: parte 1: termos e definições.** ABNT. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9862: Geossintéticos — Amostragem e preparação de corpos de prova para ensaios.** ABNT. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9864:2013. Geossintéticos — Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos.** ABNT. 2013
- ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D1435:2013 - Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics.** 2013.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D5035:11 - Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method).** 2019.
- ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D5970/D5970M:16 - Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure.** 2016.
- BALTAZAR, Paula Maria Roças. **Interfaces solo-geossintético em corte em plano inclinado.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, FEUP, Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2008.
- BARBETTA, Pedro Alberto. **Estatística aplicada às ciências sociais.** 5ª edição revisada. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002.
- BENJAMIN, C.V.S., BUENO, B.S., LODI, P.C., & ZORNBERG, J.G. **Investigação do Dano Mecânico e do Dano aos Raios Ultravioleta em Geotêxteis Expostos a Condições de Campo.** Proceedings of the *Fifth Brazilian Symposium on Geosynthetics*, Geossintéticos 2007, and of the Sixth Brazilian Congress on Environmental Geotechnics, REGEO 2007.
- BORGES, Renata Martins Horta. **Introdução à validação de métodos. Brasília: Coordenação Geral de Credenciamento–CGCRE/Inmetro–Divisão de Credenciamento de Laboratórios–Dcla.** 2006.
- BRAND, E. W., & Pang, P. L. R. **Durability of geotextiles to outdoor exposure in Hong Kong.** Journal of geotechnical engineering, v. 117, n. 7, p. 979-1000, 1991.
- CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros.** Artiliber editora, São Paulo. 2002.

CARNEIRO, José Ricardo da Cunha. **Durabilidade de Materiais Geossintéticos em Estruturas de Carácter Ambiental - A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos**. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, FEUP, Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2009.

CARNEIRO, José Ricardo da Cunha; MORAIS, Miguel; LOPES, Maria de Lurdes. **Degradação de Geotêxteis de Polipropileno em Ambiente Marinho**. 6f. 10.as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, ISBN 978-989-99439-1-9, Porto, 2016.

CARNEIRO, José Ricardo; ALMEIDA, Paulo Joaquim; LOPES, Maria de Lurdes. **Durabilidade de geotêxteis expostos a diversos factores climáticos**. 10f. Artigo Técnico Científico –Universidade do Porto, Porto, 2005.

CARNEIRO, José Ricardo; ALMEIDA, Paulo Joaquim; LOPES, Maria de Lurdes. **Laboratory evaluation of interactions in the degradation of a polypropylene geotextile in marine environments**. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2018, 2018.

CARNEIRO, José Ricardo; MORAIS, Miguel; DE LURDES LOPES, Maria. **Degradation of polypropylene geotextiles with different chemical stabilisations in marine environments**. Construction and Building Materials, v. 165, p. 877-886, 2018.

COOKE, Theodore F.; REBENFELD, Ludwig. **Effect of chemical composition and physical structure of geotextiles on their durability**. Geotextiles and Geomembranes, v. 7, n. 1-2, p. 7-22, 1988.

CORREIA, Natália de Souza. **Comportamento de geotêxteis não tecidos impregnados com emulsão asfáltica usados como sistema anti-reflexão de trincas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2010.

COSTA, C. M.; LODI, P. C.; COSTA, Y. D.; BUENO, B. S. **Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos**. Polímeros [online]. Vol. 18, n. 2. 2008.

COSTA, Carina Maia Lins. **Fluência em geotêxteis**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.

DAS NEVES, Luciana. **Geossintéticos e geossistemas em engenharia costeira**. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia, FEUP, Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2003.

DE PAOLI, Marco Aurelio. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2ª versão on-line (revisada) 2008.

ESTEVES, Eduardo. **Apontamentos de Estatística**. Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve. Área Departamental de Engenharia Alimentar, 2007.

FERREIRA, Iêda Letícia de Souza. **Tingimento de tecido de algodão com corantes reativos utilizando água do mar**. 2019. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

FERREIRA GOMES, L. M. **Geotêxteis e suas aplicações**. Seminário: A Indústria Têxtil nos Caminhos da Inovação. Universidade da Beira Interior. Covilhã. pp.10- 20. 2001.

FRANÇA, Fagner Alexandre Nunes de. **Novo equipamento para realização de ensaios confinados e acelerados de fluência em geossintéticos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2012.

Geo Soluções. Disponível em: <https://www.geosolucoes.com/geotextil-tecido-stratatex-w>. Acesso em: 30mar20.

GREENWOOD, J. H. **Durability of geosynthetics: the basics**. 2015. Disponível em: <https://geosyntheticsmagazine.com/2015/08/01/part-1-durability-of-geosynthetics-the-basics/>. Acesso em: 30mar20.

GREENWOOD, J. H.; SCHROEDER, H. F; VOSKAMP, W. **Durability of Geosynthetics**. Publication 243. The Netherland. 2012.

GRUBB, D. G., DIESING III, W. E., CHENG, S. C. J., & SABANAS, R. M. **Comparison of geotextile durability to outdoor exposure conditions in the Peruvian Andes and the Southeastern USA**. Geosynthetics International, v. 7, n. 1, p. 23-45, 2000.

GUIMARÃES, M. G. A.; DE MATTOS VIDAL, D.; DE CARVALHO URASHIMA; CASTRO, C. A. C. **Degradation of polypropylene woven geotextile: tensile creep and weathering**. Geosynthetics International, 24(2), 213-223. 2017.

HSIEH, Chiwan; WANG, Jau-Bih; CHIU, Yung-Fang. **The Degradation Behavior Of Geotextile In Ocean Environments**. 2003. 10f.National Pingtung University of Science and Technology, Taiwan, 2003.

HSIEH, Chiwan; WANG, Jau-Bih; CHIU, Yung-Fang. **Weathering properties of geotextiles in ocean environments**. Geosynthetics International, v. 13, n. 5, p. 210-217, 2006.

IGS - International Geosynthetics Society. **The durability of geotextiles**. GEOfabrics Limited - Skelton Grange Rd. United Kingdom. Disponível em: <https://www.tencategeo.us/media/50b6a456-96ab-4943-9985-a137c8ad43c3/U-y8rA/TenCate%20Geosynthetics/Documents%20AMER/Industry%20Papers/The%20durability%20of%20geotextiles.pdf> . Acesso em: 25mar20.

INBEC. Disponível em: <https://inbec.com.br/blog/geossinteticos-tecnologia-certa-para-obras-geotecnia>. Acesso em: 05mar20.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 04jul20.

ISO/TS 13434. **Geosynthetics -- Guidelines for the assessment of durability**. 2008.

- KOCKOTT, Dieter. **Natural and artificial weathering of polymers.** Polymer Degradation and Stability, v. 25, n. 2-4, p. 181-208. 1989.
- KOERNER, G. R., HSUAN, G. Y., & KOERNER, R. M. **Photo-initiated degradation of geotextiles.** Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, v. 124, n. 12, p. 1159-1166, 1998.
- KOERNER, R. M.; HSUAN, Y. G. **Geosynthetics: characteristics and testing.** In: Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook. Springer, Boston, MA. p. 173-196. 2001.
- KOERNER, R. M.; SOONG, T.-Y. **Use of geosynthetics in infrastructure remediation.** Journal of Infrastructure Systems, v. 1, n. 1, p. 66-75, 1995.
- KOERNER, Robert. **Geotextiles: from design to applications.** Woodhead Publishing, 2016.
- LIN, K., TANG, A., & WU, J. **Long-term outdoor exposure test of geosynthetics.** Pan-American Conference on Geosynthetics, GeoAmericas, Miami Beach, USA, 2016.
- LODI, Paulo César. **Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto de vinila) (PVC).** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2003.
- LODI, P. C., BUENO, B. D. S., ZORNBERG, J. G., & CORREIA, N. D. S. **Analysis of Mechanical and Physical Properties on Geotextiles after Weathering Exposure.** v. 150, p. 7.00, 2008.
- LOPES, Margarida Pinho; DE LURDES LOPES, Maria. **A durabilidade dos geossintéticos.** FEUP Edições, 2010.
- MAIA, Anderson. **Avaliação do comportamento de vida útil e flamabilidade de um nanocompósito de polipropileno modificado com aditivos funcionais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2017.
- MILAGRES, Bárbara Vidigal. **Degradação de geotêxteis frente a elementos climáticos em ensaios de campo e laboratório: realidade climática local.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2016.
- MOREIRA, Simão Pedro de Castro Neves Marques. **Efeitos da Danificação mecânica de geossintéticos no comportamento como filtro em sistemas de cobertura de estruturas de confinamento de Resíduos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 141p. 2009.
- MOREIRA, Viviane Amaral. **Degradação de geotêxteis aplicados no desaguamento de resíduos e expostos às condições climáticas de campo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 2017.

NICHOLSON, J. W. **The chemistry of polymers**. Third Edition Published by The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road. 2006.

PALMEIRA, Ennio Marques. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. Oficina de Textos, 2018.

PAULA, António Miguel Verdelho. **Danificação durante a instalação: avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, FEUP, Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2003.

PINTO, VANESSA DA CUNHA. **Estudo da Degradação de Geotêxteis Tecidos**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2006.

RABELLO, Marcelo S.; WHITE, James R. **Fotodegradação do polipropileno: Um processo essencialmente heterogêneo**. *Polímeros* [online]. 1997, vol. 7, n. 2. 1997.

ROSA, Derval dos Santos. **Correlação entre envelhecimentos acelerado e natural do prolipropileno isotático (PPI)**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 1996.

ROSETE, Ana Jorge da Costa Pereira. **Durabilidade de geossintéticos em obras ferroviárias–Abrasão e DDI**. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, 136p. 2010.

SANTOS, Helano Lima. **Influência da concentração de fosfito de trifenila e das condições de processamento na extensão de cadeia do poli (tereftalato de etileno)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. 2002.

SHUKLA, Sanjay Kumar; SHUKLA. **Geosynthetics and their applications**. London: Thomas Telford. 2002.

SHUKLA, Sanjay Kumar; YIN, Jian-Hua. **Fundamental of geosynthetic engineering**. Taylor and Francis, Balkema Publisher. 2006.

SILVA, André Luis Bonfim Bathista e; SILVA, Emerson Oliveira da. **Conhecendo materiais poliméricos**. Universidade Federal do Mato Grosso-UFMT. Instituto de Ciências Exatas e da Terra. Departamento de Física. Grupo de Pesquisa em Novos Materiais. 2003.

SUSUNAGA, Maria Paula Salazar. **Geotêxteis em separação de camadas de pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2015.

VALENTE, Inês Maria Afonso. **Monitorização dos aditivos existentes em materiais geotêxteis ao longo de diferentes processos de degradação**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2008.

VERTEMATTI, José Carlos (coordenador). **Manual brasileiro de geossintéticos**. Editora Blucher, 2015.

VERTEMATTI, José Carlos. **Curso Básico de Geotêxteis**. ABINT Associação Brasileira das Indústrias Tecidos Técnicos – Comitê Técnico Geotêxtil (CTG). 2001.

WIEWEL, Barbara Vé; LAMOREE, Marja. **Geotextile composition, application and ecotoxicology—A review**. Journal of Hazardous Materials, v. 317, p. 640-655, 2016.

## APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO GEOTÊXTIL VIRGEM

Tabela 1 - Massa por unidade de área do geotêxtil Virgem

Amostra	Medidas dos lados (cm)		Área (cm <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Massa (g)	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )
1	9,95	9,95	99,00	0,0099	2,72	274,74
2	9,95	9,95	99,00	0,0099	2,68	270,70
3	9,90	10,05	99,50	0,0099	2,72	273,38
4	9,95	9,95	99,00	0,0099	2,72	274,74
5	10,00	9,95	99,50	0,0100	2,72	273,37
6	9,95	10,00	99,50	0,0100	2,68	269,35
7	10,00	9,90	99,00	0,0099	2,67	269,70
8	10,00	10,00	100,00	0,0100	2,70	270,00
9	10,00	10,05	100,50	0,0101	2,68	266,67
10	10,00	10,00	100,00	0,0100	2,70	270,00
Valor médio						271,26
Desvio Padrão						2,66
Coeficiente de variação (C.V.)						0,98

Tabela 2 – Ensaio de Tração – Sentido Transversal

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
1	3,87	22,24%	57,66
2	4,07	21,46%	55,51
3	3,18	17,03%	51,22
4	3,77	19,95%	56,59
5	4,18	20,36%	53,64
6	3,73	21,46%	53,37
7	4,22	24,20%	57,66
8	4,42	20,72%	48,27
9	4,57	22,51%	46,66
10	3,98	22,65%	56,32
Média	4,00	21,26%	53,69
Desv. Pad.	0,39	1,94%	3,87
Coef. Var.	9,83	9,13	7,21

Tabela 3 – Ensaio de Tração – Sentido Longitudinal

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
11	2,02	10,80%	45,59
12	2,20	10,97%	51,22
13	2,07	10,73%	46,66
14	2,22	10,99%	47,74
15	1,98	10,25%	45,59
16	2,43	12,09%	53,91
17	2,03	10,12%	46,93
18	2,17	11,41%	49,61
19	2,27	11,89%	49,35
20	1,95	9,93%	44,25
Média	2,13	10,92%	48,09
Desv. Pad.	0,15	0,72%	2,95
Coef. Var.	7,07	6,60	6,13

## APÊNDICE B – RESULTADOS PÓS EXPOSIÇÃO EM CAMPO

Tabela 1 – Dados do 1º Período de Exposição

DATA	PRESSAO ATMOSFERICA MÉDIA (mB)	UMIDADE RELATIVA DO AR MÉDIA (%)	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)	RADIAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA (MJ/m <sup>2</sup> )	RADIACAO GLOBAL ACUMULADA (KJ/m <sup>2</sup> )
31/03/2020	1.004,10	87,42	25	30	56,60	3,35	19.996,60
01/04/2020	1.004,93	81,58	25	30	2,60	3,05	22.079,70
02/04/2020	1.006,37	87,21	26	31	34,20	3,10	18.926,90
03/04/2020	1.005,47	86,13	25	31	1,80	3,56	25.515,60
04/04/2020	1.005,01	85,00	26	30	3,00	3,27	21.014,80
05/04/2020	1.005,97	83,29	27	30	3,40	3,02	21.049,70
06/04/2020	1.006,92	79,21	28	31	3,20	3,62	23.627,20
07/04/2020	1.006,40	76,58	26	31	0,20	3,55	23.615,70
08/04/2020	1.005,17	76,75	26	31	0,00	3,53	24.529,50
09/04/2020	1.005,15	79,21	26	31	0,00	3,29	23.710,60
10/04/2020	1.005,95	80,92	26	30	1,00	3,05	18.368,10
11/04/2020	1.006,00	80,04	25	31	5,20	3,51	22.843,40
12/04/2020	1.006,21	73,75	26	31	0,00	3,55	24.592,50
13/04/2020	1.005,65	74,33	25	30	0,00	3,50	24.565,80
14/04/2020	1.004,81	77,83	24	30	0,00	3,48	23.048,50
15/04/2020	1.006,23	86,71	23	28	56,20	1,58	8.459,60
16/04/2020	1.007,73	90,88	24	28	13,80	1,37	6.848,20
17/04/2020	1.007,54	87,79	24	30	3,40	2,67	18.598,80
18/04/2020	1.007,70	86,08	24	31	6,20	2,54	15.432,50
19/04/2020	1.007,46	83,42	25	30	0,00	3,16	23.669,80
20/04/2020	1.006,80	84,08	24	30	2,40	3,49	23.785,70
21/04/2020	1.006,51	88,71	24	27	19,80	1,45	7.878,10
22/04/2020	1.006,57	85,71	23	30	38,40	3,22	21.045,30
23/04/2020	1.005,87	82,54	25	30	0,40	3,39	23.586,30
24/04/2020	1.006,31	85,38	25	29	7,00	2,98	20.422,00
25/04/2020	1.006,51	85,04	24	30	8,40	2,75	15.904,20
26/04/2020	1.007,04	85,63	25	29	1,80	3,26	17.718,30
27/04/2020	1.007,34	84,38	25	30	4,80	3,32	23.407,30
28/04/2020	1.007,58	84,13	25	30	4,20	2,83	18.796,80
29/04/2020	1.008,12	85,13	25	29	6,00	2,67	13.714,80
CÁLCULO		83,16			284,00	91,10	596.752,30

Tabela 2 – Dados do 2º Período de Exposição

DATA	PRESSAO ATMOSFERICA MÉDIA (mB)	UMIDADE RELATIVA DO AR MÉDIA (%)	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)	RADIAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA (MJ/m <sup>2</sup> )	RADIACAO GLOBAL ACUMULADA (KJ/m <sup>2</sup> )
31/03/2020	1.004,10	87,42	25	30	56,60	3,35	19.996,60
01/04/2020	1.004,93	81,58	25	30	2,60	3,05	22.079,70
02/04/2020	1.006,37	87,21	26	31	34,20	3,10	18.926,90
03/04/2020	1.005,47	86,13	25	31	1,80	3,56	25.515,60
04/04/2020	1.005,01	85,00	26	30	3,00	3,27	21.014,80
05/04/2020	1.005,97	83,29	27	30	3,40	3,02	21.049,70
06/04/2020	1.006,92	79,21	28	31	3,20	3,62	23.627,20
07/04/2020	1.006,40	76,58	26	31	0,20	3,55	23.615,70
08/04/2020	1.005,17	76,75	26	31	0,00	3,53	24.529,50
09/04/2020	1.005,15	79,21	26	31	0,00	3,29	23.710,60
10/04/2020	1.005,95	80,92	26	30	1,00	3,05	18.368,10
11/04/2020	1.006,00	80,04	25	31	5,20	3,51	22.843,40
12/04/2020	1.006,21	73,75	26	31	0,00	3,55	24.592,50
13/04/2020	1.005,65	74,33	25	30	0,00	3,50	24.565,80
14/04/2020	1.004,81	77,83	24	30	0,00	3,48	23.048,50
15/04/2020	1.006,23	86,71	23	28	56,20	1,58	8.459,60
16/04/2020	1.007,73	90,88	24	28	13,80	1,37	6.848,20
17/04/2020	1.007,54	87,79	24	30	3,40	2,67	18.598,80
18/04/2020	1.007,70	86,08	24	31	6,20	2,54	15.432,50
19/04/2020	1.007,46	83,42	25	30	0,00	3,16	23.669,80
20/04/2020	1.006,80	84,08	24	30	2,40	3,49	23.785,70
21/04/2020	1.006,51	88,71	24	27	19,80	1,45	7.878,10
22/04/2020	1.006,57	85,71	23	30	38,40	3,22	21.045,30
23/04/2020	1.005,87	82,54	25	30	0,40	3,39	23.586,30
24/04/2020	1.006,31	85,38	25	29	7,00	2,98	20.422,00
25/04/2020	1.006,51	85,04	24	30	8,40	2,75	15.904,20
26/04/2020	1.007,04	85,63	25	29	1,80	3,26	17.718,30
27/04/2020	1.007,34	84,38	25	30	4,80	3,32	23.407,30
28/04/2020	1.007,58	84,13	25	30	4,20	2,83	18.796,80
29/04/2020	1.008,12	85,13	25	29	6,00	2,67	13.714,80
30/04/2020	1.007,42	82,42	24	30	0,00	3,31	22.921,90
01/05/2020	1.008,54	83,67	25	31	1,80	3,33	21.121,10
02/05/2020	1.008,00	84,08	25	29	4,80	2,40	15.550,90
03/05/2020	1.006,74	82,63	25	30	5,00	3,10	22.348,80
04/05/2020	1.006,23	90,38	25	26	41,00	0,65	3.540,70
05/05/2020	1.005,87	85,67	24	30	11,60	2,83	19.166,90
06/05/2020	1.006,60	82,50	25	30	36,20	3,09	22.338,90
07/05/2020	1.006,10	76,50	24	30	0,00	3,13	22.037,00

08/05/2020	1.007,28	77,75	24	30	0,00	2,32	16.555,40
09/05/2020	1.008,20	77,17	25	29	0,00	1,62	10.909,70
10/05/2020	1.008,75	77,33	23	30	0,00	3,25	22.239,50
11/05/2020	1.008,07	77,96	24	30	0,00	3,23	22.175,40
12/05/2020	1.007,35	80,46	24	30	0,60	3,22	22.206,60
13/05/2020	1.006,49	83,29	25	29	4,20	2,68	15.927,40
14/05/2020	1.006,68	88,38	24	28	10,60	2,20	12.611,90
15/05/2020	1.007,55	94,54	24	27	19,80	0,75	5.562,10
16/05/2020	1.007,90	97,38	24	25	122,60	0,57	2.267,30
17/05/2020	1.008,01	87,33	24	30	0,20	3,09	20.439,20
18/05/2020	1.008,40	84,54	25	30	0,00	2,69	19.681,40
19/05/2020	1.008,34	83,88	25	30	0,00	3,18	21.879,90
20/05/2020	1.008,05	90,46	25	28	17,60	2,59	15.132,20
21/05/2020	1.008,03	86,88	24	29	6,00	2,92	18.104,10
22/05/2020	1.008,24	89,29	24	28	60,20	2,42	15.671,10
23/05/2020	1.008,53	95,75	23	26	24,80	1,10	5.053,10
24/05/2020	1.008,12	96,04	24	25	28,40	0,86	5.418,50
25/05/2020	1.007,88	88,04	23	29	0,00	3,05	19.740,40
26/05/2020	1.008,22	86,79	24	30	1,20	2,77	18.138,50
27/05/2020	1.007,45	85,83	24	30	0,00	2,99	19.875,10
28/05/2020	1.006,97	84,33	25	30	14,00	3,07	19.332,40
CÁLCULO		84,34			694,60	163,50	1.074.699,70

Tabela 3 – Dados do 3º Período de Exposição

DATA	PRESSAO ATMOSFERICA MÉDIA (mB)	UMIDADE RELATIVA DO AR MÉDIA (%)	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	PRECIPITAÇÃO TOTAL (mm)	RADIAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA (MJ/m²)	RADIAÇÃO GLOBAL ACUMULADA (KJ/m²)
31/03/2020	1.004,10	87,42	25	30	56,60	3,35	19.996,60
01/04/2020	1.004,93	81,58	25	30	2,60	3,05	22.079,70
02/04/2020	1.006,37	87,21	26	31	34,20	3,10	18.926,90
03/04/2020	1.005,47	86,13	25	31	1,80	3,56	25.515,60
04/04/2020	1.005,01	85,00	26	30	3,00	3,27	21.014,80
05/04/2020	1.005,97	83,29	27	30	3,40	3,02	21.049,70
06/04/2020	1.006,92	79,21	28	31	3,20	3,62	23.627,20
07/04/2020	1.006,40	76,58	26	31	0,20	3,55	23.615,70
08/04/2020	1.005,17	76,75	26	31	0,00	3,53	24.529,50
09/04/2020	1.005,15	79,21	26	31	0,00	3,29	23.710,60
10/04/2020	1.005,95	80,92	26	30	1,00	3,05	18.368,10
11/04/2020	1.006,00	80,04	25	31	5,20	3,51	22.843,40
12/04/2020	1.006,21	73,75	26	31	0,00	3,55	24.592,50
13/04/2020	1.005,65	74,33	25	30	0,00	3,50	24.565,80

14/04/2020	1.004,81	77,83	24	30	0,00	3,48	23.048,50
15/04/2020	1.006,23	86,71	23	28	56,20	1,58	8.459,60
16/04/2020	1.007,73	90,88	24	28	13,80	1,37	6.848,20
17/04/2020	1.007,54	87,79	24	30	3,40	2,67	18.598,80
18/04/2020	1.007,70	86,08	24	31	6,20	2,54	15.432,50
19/04/2020	1.007,46	83,42	25	30	0,00	3,16	23.669,80
20/04/2020	1.006,80	84,08	24	30	2,40	3,49	23.785,70
21/04/2020	1.006,51	88,71	24	27	19,80	1,45	7.878,10
22/04/2020	1.006,57	85,71	23	30	38,40	3,22	21.045,30
23/04/2020	1.005,87	82,54	25	30	0,40	3,39	23.586,30
24/04/2020	1.006,31	85,38	25	29	7,00	2,98	20.422,00
25/04/2020	1.006,51	85,04	24	30	8,40	2,75	15.904,20
26/04/2020	1.007,04	85,63	25	29	1,80	3,26	17.718,30
27/04/2020	1.007,34	84,38	25	30	4,80	3,32	23.407,30
28/04/2020	1.007,58	84,13	25	30	4,20	2,83	18.796,80
29/04/2020	1.008,12	85,13	25	29	6,00	2,67	13.714,80
30/04/2020	1.007,42	82,42	24	30	0,00	3,31	22.921,90
01/05/2020	1.008,54	83,67	25	31	1,80	3,33	21.121,10
02/05/2020	1.008,00	84,08	25	29	4,80	2,40	15.550,90
03/05/2020	1.006,74	82,63	25	30	5,00	3,10	22.348,80
04/05/2020	1.006,23	90,38	25	26	41,00	0,65	3.540,70
05/05/2020	1.005,87	85,67	24	30	11,60	2,83	19.166,90
06/05/2020	1.006,60	82,50	25	30	36,20	3,09	22.338,90
07/05/2020	1.006,10	76,50	24	30	0,00	3,13	22.037,00
08/05/2020	1.007,28	77,75	24	30	0,00	2,32	16.555,40
09/05/2020	1.008,20	77,17	25	29	0,00	1,62	10.909,70
10/05/2020	1.008,75	77,33	23	30	0,00	3,25	22.239,50
11/05/2020	1.008,07	77,96	24	30	0,00	3,23	22.175,40
12/05/2020	1.007,35	80,46	24	30	0,60	3,22	22.206,60
13/05/2020	1.006,49	83,29	25	29	4,20	2,68	15.927,40
14/05/2020	1.006,68	88,38	24	28	10,60	2,20	12.611,90
15/05/2020	1.007,55	94,54	24	27	19,80	0,75	5.562,10
16/05/2020	1.007,90	97,38	24	25	122,60	0,57	2.267,30
17/05/2020	1.008,01	87,33	24	30	0,20	3,09	20.439,20
18/05/2020	1.008,40	84,54	25	30	0,00	2,69	19.681,40
19/05/2020	1.008,34	83,88	25	30	0,00	3,18	21.879,90
20/05/2020	1.008,05	90,46	25	28	17,60	2,59	15.132,20
21/05/2020	1.008,03	86,88	24	29	6,00	2,92	18.104,10
22/05/2020	1.008,24	89,29	24	28	60,20	2,42	15.671,10
23/05/2020	1.008,53	95,75	23	26	24,80	1,10	5.053,10
24/05/2020	1.008,12	96,04	24	25	28,40	0,86	5.418,50
25/05/2020	1.007,88	88,04	23	29	0,00	3,05	19.740,40

26/05/2020	1.008,22	86,79	24	30	1,20	2,77	18.138,50
27/05/2020	1.007,45	85,83	24	30	0,00	2,99	19.875,10
28/05/2020	1.006,97	84,33	25	30	14,00	3,07	19.332,40
29/05/2020	1.007,34	84,79	25	29	5,60	2,12	15.070,10
30/05/2020	1.007,68	81,88	24	29	5,00	2,14	14.432,30
31/05/2020	1.008,09	86,17	24	29	7,00	2,83	19.768,50
01/06/2020	1.008,08	85,46	24	29	0,40	3,04	21.153,70
02/06/2020	1.008,45	81,83	25	29	0,00	3,06	21.426,50
03/06/2020	1.008,83	84,17	24	29	1,40	2,47	16.587,70
04/06/2020	1.008,38	80,75	25	30	0,00	3,08	20.864,70
05/06/2020	1.009,10	83,92	24	29	4,80	3,04	18.596,90
06/06/2020	1.008,87	84,21	24	30	0,20	2,03	13.337,90
07/06/2020	1.009,50	89,08	23	28	13,80	2,25	10.958,00
08/06/2020	1.008,31	82,42	23	29	0,00	2,96	20.623,60
09/06/2020	1.007,80	84,25	24	28	11,00	2,82	19.136,10
10/06/2020	1.008,13	87,00	23	29	43,60	3,06	20.768,50
11/06/2020	1.009,01	94,29	23	26	53,20	0,76	3.975,30
12/06/2020	1.007,17	84,88	24	29	13,40	2,92	17.599,40
13/06/2020	1.007,34	84,58	24	29	4,00	3,07	18.720,50
14/06/2020	1.008,20	81,58	24	29	0,00	2,79	17.684,40
15/06/2020	1.008,52	81,63	23	29	0,40	2,96	21.090,10
16/06/2020	1.009,22	88,17	23	27	14,20	1,54	9.441,30
17/06/2020	1.008,36	85,83	23	28	16,40	2,06	12.678,60
18/06/2020	1.008,55	90,29	22	26	24,80	1,58	8.903,60
19/06/2020	1.009,36	94,50	23	26	35,60	1,68	9.017,00
20/06/2020	1.009,45	84,88	23	28	22,40	2,68	16.479,60
21/06/2020	1.009,00	77,42	23	29	2,20	2,67	17.821,60
22/06/2020	1.007,92	77,46	23	29	0,00	2,28	14.692,50
23/06/2020	1.006,58	75,71	23	28	0,00	1,94	15.242,10
24/06/2020	1.006,58	77,33	24	28	0,00	2,04	11.356,50
25/06/2020	1.007,71	74,04	23	29	0,00	2,83	16.841,60
26/06/2020	1.008,10	84,25	22	29	4,40	2,90	19.417,80
27/06/2020	1.007,21	88,00	23	28	30,80	2,53	14.670,60
28/06/2020	1.007,73	83,96	23	28	0,80	2,98	20.149,90
29/06/2020	1.007,89	85,58	23	28	8,80	1,98	12.796,50
CÁLCULO		84,25			1.018,80	242,56	1.586.003,10

**Tabela 4 – Ensaio de Tração – Pós exposição na mesa – 1º Período**

<b>Nº do CP</b>	<b>Tempo decorrido de ensaio (s)</b>	<b>Deformação no colapso</b>	<b>Resistência a Tração (kN/m)</b>
21	3,90	23,45%	55,51
22	3,98	22,68%	56,05
23	3,77	20,33%	54,71
24	4,40	24,58%	55,78
25	3,53	18,89%	48,54
26	3,37	17,59%	48,54
Média	3,83	21,25%	53,19
Desv. Pad.	0,36	2,75%	3,63
Coef. Var.	9,50	12,94	6,82

**Tabela 5 – Ensaio de Tração – Pós exposição na mesa – 2º Período**

<b>Nº do CP</b>	<b>Tempo decorrido de ensaio (s)</b>	<b>Deformação no colapso</b>	<b>Resistência a Tração (kN/m)</b>
45	3,77	20,25%	54,71
46	4,00	23,51%	59,00
47	4,43	24,17%	56,05
48	4,42	24,49%	58,73
49	4,18	20,00%	50,96
50	4,00	22,95%	54,17
Média	4,13	22,56%	55,60
Desv. Pad.	0,26	1,96%	3,03
Coef. Var.	6,33	8,70	5,45

**Tabela 6 – Ensaio de Tração – Pós exposição na mesa – 3º Período**

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
69	4,23	23,38%	54,71
70	4,27	22,46%	53,91
71	4,37	24,74%	58,20
72	4,03	23,54%	53,37
73	4,30	24,75%	55,25
74	3,57	20,52%	52,83
Média	4,13	23,23%	54,71
Desv. Pad.	0,30	1,59%	1,92
Coef. Var.	7,19	6,83	3,51

**Tabela 7 – Ensaio de Tração – Pós exposição na areia – 1º Período**

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
27	4,03	23,03%	57,93
28	3,60	21,19%	53,37
29	3,77	21,08%	55,78
30	4,00	20,44%	54,71
31	3,47	18,62%	53,91
32	3,60	20,75%	54,44
Média	3,74	20,85%	55,02
Desv. Pad.	0,23	1,42%	1,64
Coef. Var.	6,18	6,80	2,98

**Tabela 8 – Ensaio de Tração – Pós exposição na areia – 2º Período**

<b>Nº do CP</b>	<b>Tempo decorrido de ensaio (s)</b>	<b>Deformação no colapso</b>	<b>Resistência a Tração (kN/m)</b>
<b>51</b>	3,97	22,77%	53,10
<b>52</b>	3,90	21,99%	51,76
<b>53</b>	4,40	25,04%	57,93
<b>54</b>	3,98	21,36%	55,51
<b>55</b>	3,90	23,73%	56,86
<b>56</b>	3,97	21,27%	50,69
Média	4,02	22,69%	54,31
Desv. Pad.	0,19	1,48%	2,90
Coef. Var.	4,72	6,52	5,34

**Tabela 9 – Ensaio de Tração – Pós exposição na areia – 3º Período**

<b>Nº do CP</b>	<b>Tempo decorrido de ensaio (s)</b>	<b>Deformação no colapso</b>	<b>Resistência a Tração (kN/m)</b>
<b>75</b>	4,70	27,44%	59,27
<b>76</b>	4,35	24,11%	55,78
<b>77</b>	4,22	24,68%	54,98
<b>78</b>	4,18	23,47%	56,05
<b>79</b>	4,35	23,53%	55,51
<b>80</b>	4,12	21,72%	50,96
Média	4,32	24,16%	55,43
Desv. Pad.	0,21	1,89%	2,66
Coef. Var.	4,82	7,82	4,81

**Tabela 10 – Ensaio de Tração – Pós exposição na areia e imerso – 1º Período**

<b>Nº do CP</b>	<b>Tempo decorrido de ensaio (s)</b>	<b>Deformação no colapso</b>	<b>Resistência a Tração (kN/m)</b>
<b>33</b>	3,65	17,84%	52,03
<b>34</b>	3,55	19,56%	56,32
<b>35</b>	3,73	22,18%	56,86
<b>36</b>	3,83	20,00%	55,51
<b>37</b>	3,97	23,07%	56,59
<b>38</b>	3,95	22,21%	54,44
Média	3,78	20,81%	55,29
Desv. Pad.	0,17	2,00%	1,82
Coef. Var.	4,40	9,62	3,30

**Tabela 11 – Ensaio de Tração – Pós exposição na areia e imerso – 2º Período**

<b>Nº do CP</b>	<b>Tempo decorrido de ensaio (s)</b>	<b>Deformação no colapso</b>	<b>Resistência a Tração (kN/m)</b>
<b>57</b>	3,27	18,92%	51,49
<b>58</b>	4,12	23,36%	57,93
<b>59</b>	4,03	23,56%	54,98
<b>60</b>	3,83	19,67%	50,69
<b>61</b>	3,92	20,36%	52,56
<b>62</b>	3,78	23,54%	57,12
Média	3,82	21,57%	54,13
Desv. Pad.	0,30	2,15%	3,01
Coef. Var.	7,85	9,98	5,56

**Tabela 12 – Ensaio de Tração – Pós exposição na areia e imerso – 3º Período**

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
81	4,17	22,52%	55,25
82	4,38	23,63%	53,37
83	3,68	21,63%	53,37
84	3,83	19,97%	50,42
85	4,13	20,25%	49,08
86	4,77	21,77%	49,88
Média	4,16	21,63%	51,89
Desv. Pad.	0,39	1,38%	2,44
Coef. Var.	9,32	6,38	4,70

**Tabela 13 – Ensaio de Tração – Pós exposição imerso em água – 1º Período**

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
39	3,72	19,39%	52,56
40	3,82	23,88%	58,20
41	3,22	17,60%	53,37
42	3,73	21,52%	56,86
43	4,30	23,07%	57,66
44	4,37	24,45%	57,66
Média	3,86	21,65%	56,05
Desv. Pad.	0,42	2,70%	2,44
Coef. Var.	11,01	12,46	4,35

**Tabela 14 – Ensaio de Tração – Pós exposição imerso em água – 2º Período**

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
63	3,73	21,88%	55,51
64	4,82	26,95%	57,93
65	4,20	23,12%	56,05
66	4,32	24,86%	53,37
67	4,52	25,73%	56,86
68	4,53	24,93%	56,59
Média	4,35	24,58%	56,05
Desv. Pad.	0,37	1,82%	1,55
Coef. Var.	8,49	7,39	2,76

**Tabela 15 – Ensaio de Tração – Pós exposição imerso em água – 3º Período**

Nº do CP	Tempo decorrido de ensaio (s)	Deformação no colapso	Resistência a Tração (kN/m)
87	4,38	24,14%	56,32
88	4,48	22,27%	51,22
89	4,20	24,48%	53,64
90	4,13	22,97%	55,51
91	4,38	24,98%	55,51
92	4,03	23,98%	56,32
Média	4,27	23,81%	54,76
Desv. Pad.	0,17	1,00%	1,99
Coef. Var.	4,07	4,21	3,63