

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA
ENGENHARIA AMBIENTAL**

GABRIEL CANGEMI FRATASSI

**DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS DE PET E PP EXPOSTOS A
INTEMPÉRIES E CÂMARA DE ENVELHECIMENTO ACELERADO POR UV**

**São Carlos
2018**

GABRIEL CANGEMI FRATASSI

**DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS DE PET E PP EXPOSTOS A
INTEMPÉRIES E CÂMARA DE ENVELHECIMENTO ACELERADO POR UV**

**Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia Ambiental da
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo.**

**Orientador: Prof. Dr. Jefferson Lins da
Silva**

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F884d Fratassi, Gabriel Cangemi
 Durabilidade De Geotêxteis Não Tecidos De PET e PP
Expostos a Intempéries e Câmara de Envelhecimento
Acelerado Por UV / Gabriel Cangemi Fratassi; orientador
Jefferson Lins da Silva. São Carlos, 2018.

 Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2018.

 1. Geotêxteis . 2. Durabilidade. 3. PET. 4. PP. 5.
Calorimetria exploratória diferencial. 6. Resistência a
tração. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Gabriel Cangemi Fratassi**

Data da Defesa: 26/10/2018

Comissão Julgadora:

Resultado:

Jefferson Lins da Silva (Orientador(a))

Aprovado

Yara Barbosa Franco

Aprovado

Clever Aparecido Valentim

aprovado



Prof. Dr. Marcelo Zaiat
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar a capacidade e a chance de perseguir meus sonhos.

À minha família e amigos, por todo companheirismo, amor e paciência.

À os meus mentores acadêmicos do curso de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos. Em especial o prof. Dr. Jefferson Lins da Silva e o Msc. Clever Valentim, pelo conhecimento a mim transferido e a Dr. Yara Barbosa Franco, pelas valiosas sugestões para a melhoria deste trabalho.

À Universidade de São Paulo, por todas oportunidades que essa grande instituição me abriu, por fim ao contribuinte paulista que financia as universidades do Estado de São Paulo, espero poder retribuir o investimento na minha formação.

RESUMO

Fratassi, G. C. **Durabilidade de geotêxteis não tecidos de PET e PP expostos a intempéries e câmara de envelhecimento acelerado por UV.** 2018. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018).

Geotêxteis não tecidos agulhados são altamente suscetíveis a degradação por radiação ultravioleta. A disposição das fibras nesses materiais permite uma grande superfície de contato com a luz. Mesmo com a presença de aditivos que retardam esses processos, a decomposição ainda ocorre e pode comprometer a durabilidade destes produtos a longo prazo. Este trabalho propõe avaliar os efeitos do envelhecimento por UV em geotêxteis não-tecidos de fibra cortada, de PP e PET, ambos com 400 g/m², considerando a variabilidade dos valores de propriedades físicas, mecânicas e químicas. Foram utilizados dois métodos de envelhecimento: exposição às intempéries em painel, na cidade de São Carlos - SP (22° 0' 55" Sul, 47° 53' 28" Oeste), e por câmara de envelhecimento acelerado por UV, com lâmpadas UVA 351, programados em ciclos 8 horas de UV a 70 ° C por 4 horas de condensação a 50 ° C. Os períodos de amostragem para a câmara foram de 250, 500, 750 e 1000 horas, e para o painel de exposição 6 meses. Comparou-se, para cada procedimento de envelhecimento os seguintes parâmetros: massa por unidade de área, resistência à tração faixa estreita sentido longitudinal e calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os resultados não mostraram perda de massa significativa e a DSC indicou que as propriedades químicas do material foram pouco alteradas. Entretanto, os resultados mecânicos mostraram uma tendência de perda da resistência média à tração nas amostras envelhecidas (2,5% no PP e 4% no PET) e, para o polipropileno, perda média de deformabilidade de aproximadamente 4%.

PALAVRAS-CHAVE: Geotêxteis, durabilidade, PET, PP, calorimetria exploratória diferencial, resistência a tração.

ABSTRACT

Fratassi, G. C. **Outdoor exposed and accelerated UV aged PET and PP nonwovens geotextiles durability**. 2018. Monografia (Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018).

Needle-punched nonwovens geotextiles are highly susceptible to photo- initiated degradation. The fibers arrangement in these materials allows a high contact area with ultraviolet light. Although it is used additives to stabilize the polymers, the photo-initiated degradation, still an issue to geotextiles in long term. This monography tries to evaluate the aging in needle-punched nonwovens geotextiles, made of PP and PET, both with mass per unit area of 400 g/m², considering the variability of physical, mechanical and chemical proprieties. Two aging methods was used: natural field exposure in São Carlos – SP – Brazil (22° 0' 55" South, 47° 53' 28" West) during 6 months and ultraviolet-fluorescent weatherometer, with UVA 351 lamps and exposure cycles of 8 hours of light at 70 ° C and 4 hours of condensation at 50 ° C. The weatherometer samplings were 250, 500, 750, 1000 hours. Then, it was compared the mass per unit area, strip tensile test and differential scanning calorimetry. The results showed that the mass per unit area has not changed significantly. Also, the DSC results suggest that the chemical proprieties remains the same despite the aging process. However, the tensile strength slightly reduced with the aging (average of 2,5% for PP and 4% for PET), and for the PP product a reduction in strain (average 4%) was observed.

Key-words: Geotextiles, durability, PET, PP, differential scanning calorimetry, tensile strength.

Lista de ilustrações

Figura 1: Ensaio de tração em uma geogrelha.	12
Figura 2:Esquema do funcionamento de uma câmara de envelhecimento acelerado por UV	21
Figura 3: Etapas experimentais.	24
Figura 4: Subamostra e corpo de prova	25
Figura 6: Câmara de envelhecimento UV	26
Figura 7: Amostras posicionadas na câmara.	27
Figura 8: Subamostras expostas a intempéries.	28
Figura 9: Estricção (estrangulamento) da parte do corpo de prova tracionado.	29
Figura 10: Máquina universal utilizada nos ensaios de tração.....	30
Figura 11: Equipamento DSC utilizado.	31
Figura 12: Trações médias com suas respectivas deformações específicas da amostra PET	36
Figura 13: Trações medias com suas respectivas deformações específicas da amostra PP	36
Figura 14:Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PET virgem	47
Figura 15: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PET 1000 h.....	47
Figura 16: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PET envelhecido 6 meses.....	48
Figura 17: Temperatura por fluxo de calor, referente ao quinto ciclo das amostras do PET.	49
Figura 18: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PP virgem	50
Figura 19: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PP 1000 horas de envelhecimento.	50
Figura 20: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PP 6 meses de envelhecimento.....	51
Figura 21: Gráfico da temperatura por fluxo de calor, referente ao quinto ciclo das amostras do PP. ...	52
Figura 22: Geotêxtil de PET virgem, ampliação de 5 vezes.	53
Figura 23: Geotêxtil de pp virgem, ampliação de 5 vezes.	53
Figura 24:Geotêxtil de PET envelhecido 1000 horas, ampliação de 5 vezes.	53
Figura 25: Geotêxtil de PP envelhecido por 1000 horas, ampliação de 5 vezes.....	53

Lista de tabelas

Tabela 1:Resultado da massa por área do geotêxtil de PET.....	33
Tabela 2:Resultado da massa por área do geotêxtil de PP.....	33
Tabela 3: Resultados médios obtidos nos ensaios de resistência a tração faixa estreita, com os respectivos desvios padrão para o geotêxtil de PET	35
Tabela 4: Resultados médios obtidos nos ensaios de resistência a tração faixa estreita, com desvios padrão para o geotêxtil de PP.....	35
Tabela 5: Resultado da tração máxima de cada amostra do geotêxtil de PET.	38
Tabela 6: Resultados da tração máxima de cada amostra do geotêxtil de PP	39
Tabela 7:Teste-t comparando amostras PET virgem e 250 horas.	39
Tabela 8:Teste-t comparando amostras PET 250 e 500 horas.....	40
Tabela 9:Teste-t comparando amostras PET 500 e 750 horas.....	40
Tabela 10:Teste-t comparando amostra PET 750 e 1000 horas	41
Tabela 11:Teste-t comparando amostra PET virgem e 6 meses.	41
Tabela 12: Teste-t comparando amostra PET 1000 horas e 6 meses.....	42
Tabela 13:Teste-t comparando amostra PP virgem e 250 horas.....	43
Tabela 14:Teste-t comparando amostras PP 250 e 500 horas	43
Tabela 15:Teste-t comparando amostra PP 500 e 750 horas.....	43
Tabela 16:Teste-t comparando amostra PP 750 e 1000 horas.....	44
Tabela 17:Teste-t comparando amostra PP virgem e 750 horas.....	44
Tabela 18:Teste-t comparando amostra PP virgem e 1000 horas.....	45
Tabela 19: Teste-t comparando amostra PP virgem e 6 meses.....	45
Tabela 20: Teste-t comparando amostra PP 1000 e 6 meses.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação brasileira de normas técnicas
ASTM	- American Society for Testing and Materials
IGS	- International Geosynthetics Society
CE	- Polietileno clorado,
CS	- Polietileno sulfonado,
CSPE	- Polietileno clorossulfonado
CP	- Corpo de prova
DSC	- Differential scanning calorimetry (calorimetria exploratoria diferencial)
ISO	- International Organization for Standardization
NBR	- Norma Brasileira
PA	- Poliamida
PE	- Polietileno
PEMD	- Polietileno de media densidade
PEAD	- Polietileno de alta densidade
PET	-Poliéster tereftalato
PP	- Polipropileno
PVC	- Policloreto de vinila
UV	-Ultravioleta

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivo.....	3
3	Revisão bibliográfica	3
3.1	Polímeros.....	3
3.1.1	Polimerização.....	3
3.1.2	Matérias primas.....	4
3.1.3	Classificações de polímeros	5
3.1.4	Peso molecular e cristalinidade.....	5
3.1.5	Tipos de polímeros importantes para geossintéticos.....	6
3.2	Geossintéticos.....	7
3.2.1	Funções	7
3.2.2	Classificação	8
3.2.3	Propriedades e Ensaio.....	9
3.3	Degradação de geossintéticos.....	15
3.3.1	Degradação por radiação ultravioleta	17
3.3.1.1	Mecanismos de degradação.....	18
3.3.1.2	Envelhecimento por UV	19
3.3.2	Pesquisas na área.....	21
3.4	Calorimetria exploratória diferencial	22
4	Materiais e métodos	23
4.1	Preparação dos ensaios.....	24
4.2	Envelhecimento UV	25
4.3	Ensaio de tração faixa estreita.....	28
4.4	Massa por unidade de área	30
4.5	DSC	30
4.6	Registro fotográfico.....	31
4.7	Tratamento dos dados.....	31
5	Resultados e discussão	33
5.1	Massa por área.....	33
5.2	Resistência a tração	34
5.3	Análise estatística das amostras	38
5.4	DSC	46
5.5	Análise qualitativa.....	52

6	Conclusão.....	54
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	55
7	Referências bibliográficas.....	56
8	Apêndices.....	60
8.1	Apêndice 1: Ensaio de tração PET virgem.....	60
8.2	Apêndice 2: Ensaio de tração PET 250 horas.	61
8.3	Apêndice 3: Ensaio de tração PET 500 horas.	62
8.4	Apêndice 4: Ensaio de tração PET 750 horas.	63
8.5	Apêndice 5: Ensaio de tração PET 1000 horas.	64
8.6	Apêndice 6: Ensaio de tração PET 6 meses.	65
8.7	Apêndice 7: Ensaio de tração PP Vigem.	66
8.8	Apêndice 8: Ensaio de tração PP 250 horas.	67
8.9	Apêndice 9: Ensaio de tração PP 500 horas.	68
8.10	Apêndice 10: Ensaio de tração PP 750 horas.	69
8.11	Apêndice 11 Ensaio de tração PP 1000 horas.	70
8.12	Apêndice 12: Ensaio de tração PP 6 meses.	71

1 Introdução

Registros históricos mostram que o uso de materiais sintéticos para a melhoria das características do solo é uma prática antiga. Fibras vegetais eram utilizadas desde a antiguidade para melhorar a estabilidade do solo. Os romanos, por exemplo, utilizavam fibras de palha tecida no solo a ser pavimentado, para reforçar fundações em regiões pantanosas. Porém o uso de fibras vegetais, que se degradam rapidamente em condições naturais, mostram-se inviável em obras com uma vida útil elevada e essa prática de engenharia geotécnica ficou limitada até a humanidade descobrir novos materiais (SHUKLA, 2002).

Com a revolução industrial, novos materiais foram desenvolvidos, dentre eles os polímeros. Quimicamente os materiais dessa categoria são constituídos por longas cadeias orgânicas, formadas por unidades chamadas monômeros. Um tipo de polímero que se tornou muito comum são os termoplásticos, que apresentam a característica de se fundir e poderem ser remodelados da forma conveniente. Exemplos de termoplásticos são o policloreto de vinila (PVC), poliéster (PET), polietileno (PE) e polipropileno (PP) (CANEVAROLO JR., 2009).

O aprimoramento dos processos de produção industrial dos polímeros, permitiu a indústria têxtil criar produtos com aplicações geotécnicas, que a partir de então foram denominados geossintéticos. Inicialmente a indústria têxtil produziu geossintéticos com fibras sintéticas, os geotêxteis, usados para reforço, separação, evitar erosão e filtração. A partir de então surgiram novos geossintéticos com outras funções. Registros indicam que no fim da década de 1950 geossintéticos poliméricos passaram a ser utilizados para revestir blocos de concreto (EUA) e proteção contra erosão costeira (Japão) (SHUKLA, 2002).

No Brasil, as primeiras aplicações foram registradas na década 1970 na construção de obras rodoviárias. Os geotêxteis foram usados para reforçar o solo nessas obras, como, por exemplo, na BR-101 em Angra dos Reis – RJ. Nessa mesma época surgiram as primeiras produções comerciais de geotêxteis não tecidos. Na década de 1980 a indústria se aprimorou e foram surgindo outros produtos, como por exemplo as geomembranas, que foram aplicadas na impermeabilização de barragens de rejeito de mineração de alumínio. (AGUIAR; VERTEMATTI, 2004)

Atualmente os geossintéticos são amplamente utilizados em vários tipos de obras devido a sua versatilidade e viabilidade em relação as soluções convencionais. Assim tais materiais, em suas diversas aplicações, são submetidos a uma grande variedade de condições, desde o seu transporte até a sua

instalação, que podem causar mudanças no desempenho do produto a longo prazo. O impacto que as intempéries causam nos geossintéticos são motivo de debate, e são causadas por diversos fatores químicos, físicos, mecânicos e biológicos. Autores como por exemplo Carneiro, Almeida e Lopes (2014) e Koerner, Lord e Halse (1988), buscam mensurar e prever o efeito da degradação desses materiais.

No contexto da engenharia ambiental, as aplicações dos geossintéticos são variadas. As geomembranas e geocompostos têm um papel importante no acondicionamento de resíduos em aterros, ou em áreas que têm alto risco de contaminação do lençol freático (ORTEGO et al., 1995). Tal aplicação garante uma maior confiabilidade na contenção de poluentes e reduz os impactos do transporte de massas de solo para a construção de camadas impermeáveis na fundação de aterros. Outra aplicação é para a secagem de lodo em estações de tratamento de esgoto ou água, devido à capacidade de reter sólidos e secar o resíduo sem a necessidade de edificações ou equipamentos que demandam, grande quantidade de energia. Geotêxteis, georredes e geogrelhas são usados para conter e evitar erosão de solos e também para a drenagem. Por fim, outra aplicação de interesse na engenharia ambiental são os geotêxteis de fibras naturais, como os de fibra de coco. Estes possuem a vida útil limitada (METHACANON et al., 2010) e são aplicados para preparar o solo para a fixação de plantas ou mesmo recuperação de vegetações nativas (MARQUES et al., 2014).

O mesmo modelo de desenvolvimento econômico industrial, responsável pelo progresso na tecnologia de geossintéticos, é responsável por fatores que aumentam a necessidade de geossintéticos na construção civil. A formação de núcleos urbanos, gera a necessidade de eficientes sistemas de drenagem e equipamentos de infraestrutura mais robustos, em que os geossintéticos fazem parte. O progresso econômico também se relaciona com o crescimento demográfico e a melhoria do padrão de consumo. Juntos, esses fatores têm como consequência a geração de resíduos e, automaticamente, a necessidade de tratamento destes resíduos. A impermeabilização de aterros sanitários ou o desaguamento do lodo proveniente do tratamento de água e esgoto, são exemplos em que os geossintéticos são usados. Por último, acredita-se que a industrialização, e consequente uso de combustíveis fósseis, se relacione com mudanças climáticas em curso atualmente. Essas mudanças aceleram processos geológicos exógenos, aumentando processos erosivos e alterando as propriedades geotécnicas de áreas de interesse humano, em que a tecnologia em questão é uma poderosa alternativa.

2 Objetivo

A presente monografia tem a intenção de investigar e discutir sobre os efeitos do intemperismo nas propriedades mecânicas, físicas e químicas de geotêxteis, de dois polímeros diferentes, polietileno e polipropileno, de especificações técnicas similares, por meio do envelhecimento acelerado em câmara com lâmpadas que emitem luz do espectro ultravioleta (UV) e também por exposição a intempéries. Os ensaios para a comparação entre as amostras foram os de tração faixa estreita, calorimetria exploratória diferencial (DSC) e massa por unidade de área além de um registro fotográfico qualitativo.

3 Revisão bibliográfica

A presente revisão bibliográfica almeja introduzir os conceitos básicos de polímeros necessários para o entendimento das características e aplicações de geossintéticos. Sobre esses, por sua vez, detalhou-se aspectos funcionais, estruturais, aplicações, procedimentos de ensaio e propriedades importantes. Feito isso, a pesquisa aprofunda-se na degradação de geotêxteis, objeto de estudo dessa monografia, com base na literatura e experimentos realizados até então.

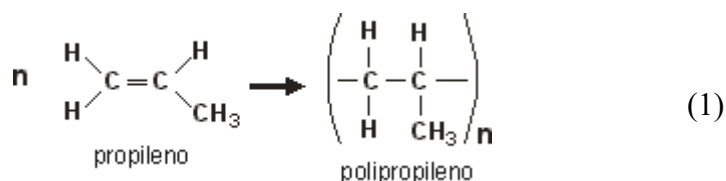
3.1 Polímeros

Polímeros são moléculas constituídas de longas cadeias em que uma ou mais unidades de molécula se repetem, essas são chamadas de monômeros. A origem etimológica da palavra vem do grego *poli* e *mero*, que significam respectivamente, muitas e partes. Quando esse material possui diferentes partes em suas cadeias, são chamadas de copolímeros (CANEVAROLO JR., 2009).

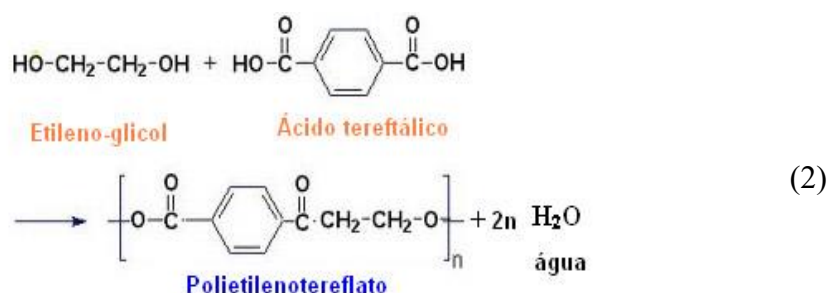
3.1.1 Polimerização

A fabricação dos polímeros ocorre das reações de polimerização. Esse processo consiste na reação entre monômeros para formar uma longa cadeia. Basicamente pode se diferenciar em dois tipos das reações de polimerização, a de adição e a condensação (CANEVAROLO JR., 2009). Na adição ocorre alteração das ligações nos monômeros, juntando-os. Já na condensação ocorre a eliminação de alguma

molécula simples como a água ou álcool. Vejamos por exemplo a reação simplificada de polimerização do polipropileno (equação 1):



Essa reação trata-se de uma adição, pois n moléculas de n propileno se rearranjam em n monômeros de uma cadeia. Já para o polietileno tereftalato outro tipo de reação ocorre (equação 2):



Nesse caso do PET ocorre a reação entre a função álcool da primeira molécula com a função ácido carboxílico da segunda, resultando no polímero com a função éster e moléculas de água.

3.1.2 Matérias primas

As matérias primas das quais são feitos os polímeros vêm de três tipos de fontes, os naturais, as derivadas de hulha e as de petróleo (CANEVAROLO JR., 2009).

As fontes naturais, são aquelas retiradas de fibras, óleos, resinas, por exemplo feitos a partir da celulose, como o acetato de celulose. Outras matérias primas naturais incluem óleo de mamona, látex retirado de seringueiras.

Já os polímeros derivados da hulha de carvão mineral, na qual pode se separar uma grande quantidade de matérias primas importantes na produção de polímeros. Por exemplo, o etileno, importante para a produção de PET e PVC.

O petróleo é a principal matéria prima para a indústria de polímeros. Um dos produtos da destilação fracionada do petróleo é a nafta. Essa última contém frações de moléculas, que depois de um processo de craqueamento geram moléculas saturadas e insaturadas, por exemplo etileno propileno e butadieno (BUENO, 2004).

3.1.3 Classificações de polímeros

Existem várias classificações para os polímeros conforme Canevarolo (2009). Uma dessas é relativa à estrutura química dos polímeros, dividindo-os em de cadeia carbônica e com cadeia heterogênea.

Outra classificação é a partir da preparação do polímero. São os polímeros de adição, condensação, artificiais e sintéticos. Também podem ser classificados de acordo com o tipo de cadeia polimérica, podendo ser, lineares ou ramificadas, estas últimas podem ser de alta densidade ou baixa densidade.

Por fim, pode-se citar a classificação relacionada às características tecnológicas de fabricação do polímero tendo dois tipos: termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos podem ser moldados sob altas temperaturas e são resistentes a temperaturas normais ou baixas. Ainda sobre esse tipo, o aquecimento não provoca reações, exceto quando esse processo é repetido várias vezes. Os termoplásticos são os materiais de base polimérica mais utilizados na indústria de geossintéticos. Os termofixos, por sua vez são materiais que depois de moldados não podem adquirir outra forma por meio do aquecimento.

3.1.4 Peso molecular e cristalinidade

O polímero em estado sólido no geral tem duas formas de organização, uma em que não há ordem em moléculas e outra ordenada que coexistem. A distribuição aleatória das moléculas é chamada de amorfa. Já quando a forma é ordenada, e é denominada cristalina, devido ao arranjo sistemático das moléculas. Um polímero nunca pode ser em sua totalidade cristalino, sendo considerados amorfos ou semicristalinos. Quanto mais organizado as moléculas do polímero, melhor a rigidez, estabilidade, resistência a abrasão e menos reativo. O grau de cristalinidade também afeta a temperatura de fusão e transição vítrea (BUENO, 2004) Transição vítrea é o ponto de temperatura em que o estado sólido se passa para um estado de mobilidade, sem que as moléculas poliméricas se prendem do conjunto (CANEVAROLO JR., 2009).

O peso molecular relaciona-se com o tamanho das cadeias poliméricas. Quanto maior as cadeias são, melhores são as propriedades mecânicas do material, sendo a principal característica de um sistema polimérico. Na fabricação desse tipo de material, ocorre uma variação natural entre as diferentes moléculas. Para estimar o peso molecular é utilizado três padrões, o peso molecular numérico médio, o peso molecular ponderal médio e o peso molecular viscométrico médio. Todas essas medias podem ser

utilizadas para representar o grau de polimerização, que expressa o número de monômeros que constituem a cadeia polimérica. Também existem formas indiretas de medir o peso molecular, uma delas é o índice de fluidez.

3.1.5 Tipos de polímeros importantes para geossintéticos

Entendidas as diferenças entre materiais e alguns parâmetros básicos dos polímeros, conclui-se que cada tipo possui diferentes características que são desejáveis em termos práticos. Assim alguns materiais são melhores para determinadas funções do que outros. Nos geossintéticos isso se relaciona ao tipo, função e aplicação.

Os principais polímeros utilizados na indústria de geossintéticos são o poliéster (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE), polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de media densidade (PEMD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno clorado (CE), polietileno clorosulfonado (CSM), poliamida (PA) e policloreto de vinil (PVC).

Nos geotêxteis, o PP e o PET são as principais matérias primas. Isso se deve ao bom custo-benefício desses materiais, quando a aplicação depende exclusivamente do geotêxtil. O PP mostra-se pouco reativo em diversas faixas de pH. Entretanto naturalmente sofre com a fotodegradação, devendo então, ser tratado com aditivos que garantem a resistência a radiação ultravioleta. Outro ponto negativo do polipropileno é sua alta fluência, assim, em grandes cargas contínuas se diminui as propriedades mecânicas. Quanto ao PET, possui boas propriedades de fluência, sendo importante aos geossintéticos usados em reforço. A resistência química do PET é alta, com exceção em faixas de pH altas. Sua resistência ao ultravioleta também é maior que a do PP, devido aos anéis aromáticos nas cadeias de PET (ORTEGO et al., 1995).

Nas geomembranas, georredes e geogrelhas outras matérias primas são utilizadas. As funções desses geossintéticos serão discutidas na próxima sessão, mas cada um desses tem diferentes aplicações, portanto necessitam de diferentes características. As geogrelhas necessitam de materiais mais resistentes, então se aplica PEAD, PET, PP e outros materiais como fibra de vidro ou de carbono. As georredes que têm função de drenagem são feitas de PEMD e PEAD. As geomembranas que necessitam ter baixa permeabilidade são feitas de PE, PVC, polietileno clorado (CPE) e polietileno clorossulfonado (CSPE) (SHUKLA, 2002).

Materiais naturais são também utilizados em geossintéticos de vida limitada. Exemplo dessas fibras naturais são a juta, fibra de coco e algodão. Os geossintéticos feitos de materiais naturais são aplicados

em casos com interesse de restauração ambiental e contra erosão. São colocados em solos erodidos ou estéreis, criando condições para o crescimento de vegetação. Isso se deve a melhora da retenção de umidade, proteção contra agentes erosivos como vento, chuva e escoamento superficial. Também servem como substrato direto para vegetação e posteriormente são decompostos nutrindo o solo (MARQUES et al., 2014; METHACANON et al., 2010).

3.2 Geossintéticos

Geossintético é um termo genérico usado para designar materiais usados junto de solos, rochas, entre outras aplicações, para uma ou mais funções geotécnicas. Geralmente os geossintéticos são feitos de polímeros, embora existam produtos feitos de outros materiais, como a fibra de juta, algodão, lã e seda, por exemplo. Os geossintéticos são classificados pela forma em que a matéria prima é disposta, por exemplo os geotêxteis são um agregado de pequenos filamentos poliméricos que formam um produto têxtil, enquanto as geomembranas têm o polímero feito de forma contínua. As diversas formas de fabricação conferem aos materiais diferentes propriedades. A seguir serão discutidas as diversas funções dos geossintéticos, seguido da classificação, aplicações, matérias primas e propriedades desses materiais, para então discutir a degradação de geotêxteis que serão foco desse trabalho.

3.2.1 Funções

Segundo a norma brasileira (NBR ISO 10318-1, 2018) existem basicamente as funções de evitar a erosão superficial, drenagem, filtração, impermeabilização, proteção, reforço e separação.

A aplicação de geossintéticos em locais com grande fluxo superficial visa atuar de duas maneiras. A primeira é a imobilização de partículas no solo e a segunda é o aumento da rugosidade das encostas, diminuindo a velocidade de escoamento superficial, conseqüentemente, as forças que promovem o carreamento das partículas.

Em relação à condução e imobilização de líquidos, os geossintéticos podem ser usados para a drenagem, filtração e impermeabilização. A drenagem trata de interceptar o fluxo do fluido (líquido e gasoso) e o direcionar para algum local desejado. Alguns geossintéticos como os geotêxteis podem ter boas propriedades de escoamento de líquidos acelerando a drenagem em solos e sistemas de drenagem. A filtração é similar a drenagem, mas evita a movimentação de fases não homogêneas dos líquidos, como

poluentes, graxas e sedimentos. Nessas duas primeiras funções é importante evitar a colmatação, ou seja, o entupimento dos poros dos geossintéticos com sedimentos, quando isso ocorre facilita falhas desses sistemas de drenagem e filtração (MISZKOWSKA; LENART; KODA, 2017). Já a impermeabilização é o contrário dos anteriores, pois evita o transporte de possíveis líquidos, na sua maioria lixiviados de resíduos sólidos ou líquidos. O principal tipo usado para esse fim são as geomembranas e geocompostos.

As últimas funções se relacionam com estruturas geotécnicas. A proteção diminui ou impede danos a elementos de obras geotécnicas. O reforço aumenta sua resistência e estabilidade. E a separação delimita diferentes camadas do solo e evitam que os solos os misturem.

3.2.2 Classificação

Existe uma gama de produtos geossintéticos, os mais comuns são os geotêxteis, geomembranas, georedes, geogrelhas e geocompostos. (SHUKLA, 2002)

Os geotêxteis são produtos compostos de fibras poliméricas, com filamentos contínuos ou não. Suas aplicações incluem a drenagem de líquidos, reforço, filtração e separação. Eles são classificados de acordo com sua forma de fabricação:

- Tecidos: as disposições dos filamentos poliméricos estão distribuídas de forma organizada, por meio do entrelaçamento, assim como na fabricação de tecidos comuns. Essa forma de fabricação garante uma excelente resistência ao produto (MILAGRES, 2016).
- Não tecidos: os filamentos poliméricos estão distribuídos de forma aleatória, que são unidos por diferentes métodos.
- Agulhados: os fios são unidos por movimentos aleatórios de agulhas. Esse tipo costuma ter boa capacidade de deformação, sendo útil para a separação de materiais (MILAGRES, 2016). Entretanto esse processo de produção confere uma característica de variações da espessura e massa, que reflete nas propriedades do produto ao longo de seu comprimento (CASSIDY et al., 1992) .
- Termoligados, as fibras poliméricas se unem pelo aquecimento e fusão parcial. Esse tipo tem menor rigidez, espessura e propriedades hidráulicas inferiores ao geotêxtil não tecido agulhado. Entretanto, possuem propriedades mecânicas melhores (MILAGRES, 2016).
- Resinados: a união dos filamentos ocorre por meio de produtos químicos. Esse método de fabricação é menos comum devido ao alto custo (MILAGRES, 2016).

As geogrelhas são produtos em forma de malhas com considerável abertura. Podem ser unidas por extrusão, soldadas ou tecidas. Dependendo das direções de maior resistência à tração podem ser

classificadas por unidimensional e bidimensional. A primeira tem maior resistência longitudinal e a segunda tem maior resistência em ambos sentidos (MILAGRES, 2016). O principal uso é o reforço de solo e rochas.

As georredes são malhas extrudadas, geralmente com abertura em formato hexagonal. Elas se diferem das geogrelhas em sua função principal, que é a drenagem.

As geomembranas são materiais termoplásticos, asfálticos, elastoméricos ou a combinação desses. Sua característica principal é a baixíssima permeabilidade, o que implica em um material com poros do tamanho de uma molécula dissolvida (TOUZE-FOLTZ et al., 2016). Sendo muito aplicada em impermeabilização e contenção de resíduos líquidos ou resíduos sólidos não inertes, especialmente resíduos que possuem grande potencial de contaminação do solo e lençol freático.

Os geocompostos são a combinação de diferentes geossintéticos sobrepostos de fábrica, para realizar uma ou várias finalidades. Algumas combinações, por exemplo, são geotêxteis- geomembranas, geotêxteis- geogrelhas, georede-geomembrana, que desempenham respectivamente, filtração e impermeabilização, filtração e drenagem, reforço e impermeabilização (SHUKLA, 2002).

Por fim existem, outras denominações de tipos de geossintéticos nas normas da International Geosynthetic Society (IGS) e da norma brasileira NBR 10.318-1. Pode-se citar geocélula, geotubos, geobarra, que possuem funções e aplicações similares aos já citados, assim seria redundante detalhar as variedades mais específicas de geossintéticos.

3.2.3 Propriedades e Ensaio

Tratando-se de materiais usados na construção civil, os geossintéticos devem ser utilizados com a total ciência de suas propriedades e o comportamento. A escolha equivocada pode acarretar em danos ambientais e estruturais, como o que aconteceu por exemplo, no porto de Gladstone na Austrália, onde foi empregado geotêxtil para reter sedimentos finos, resultantes da dragagem deste porto. O aterramento marítimo estava sob condições de marés, correntes, ventos, água salgada, abrasão, luz ultravioleta, entre outros fatores, que não foram totalmente considerados pelos projetistas, resultando na escolha de um geotêxtil e métodos construtivos equivocados e causando o fluxo de sedimentos finos em uma área de proteção ambiental marinha (HORNSEY; SERVICE, 2017).

Existem normas para determinação das propriedades dos geossintéticos, que são basicamente propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas. Os próximos tópicos irão revisar essas propriedades e suas normas e métodos de ensaio.

3.2.4 Propriedades físicas

As principais propriedades físicas de interesse em geossintéticos são a massa por área, espessura, e porosidade (BUENO; VILAR, 2004). As propriedades físicas dependem bastante da temperatura e umidade, portanto é necessário o controle dessas condições para esses ensaios (SHUKLA, 2002).

A massa por área sozinha não indica muitos parâmetros, mas está diretamente associada ao gasto de matéria prima, consequentemente o custo, também pode ser usado para diferenciar produtos similares. Em geotêxteis comerciais a massa por área varia entre 100 e 900 g/m². Nos experimentos do trabalho utilizou-se geotêxteis de gramatura 500 g/m². A norma brasileira que direciona os ensaios de massa por área é a ABNT NBR ISO 9864 (2013).

A espessura indica a distância entre duas placas paralelas comprimindo o geossintético sob uma tensão vertical de 2 kPa. Os geotêxteis não tecidos e geocompostos diminuem a sua espessura devido à força vertical, enquanto outros como geotêxteis tecidos e geomembranas costumam serem rígidos. Para os geossintéticos não rígidos, a norma ABNT NBR ISO 9863-1(2013) sugere considerar a medida feita após de 30 segundos sob tensão normal (BUENO; VILAR, 2004).

Com a espessura, massa por área e massa específica de um líquido e do polímero, é possível calcular a porosidade. Essa unidade, usada geralmente em geotêxteis, relaciona o volume do geossintético com o volume de vazios. A expressão (equação 3) é usada para calcular a porosidade:

$$n_{gs} = \left(1 - \frac{\mu_A}{t_{gt} \cdot \rho_f \cdot \rho_w} \right) \quad (3)$$

Onde: μ_A é a massa por área, t_s é a espessura nominal, ρ_f e ρ_w são as massas específicas da fibra do geotêxtil e da água, respectivamente (BUENO; VILAR, 2004).

3.2.5 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são importantes para o dimensionamento do material, principalmente quando o geossintético exerce uma função estrutural ou sofrerá com esforços localizados. As propriedades mais usuais são a compressibilidade, resistência a tração unidirecional, tração multidirecional, puncionamento, rasgo e fluência

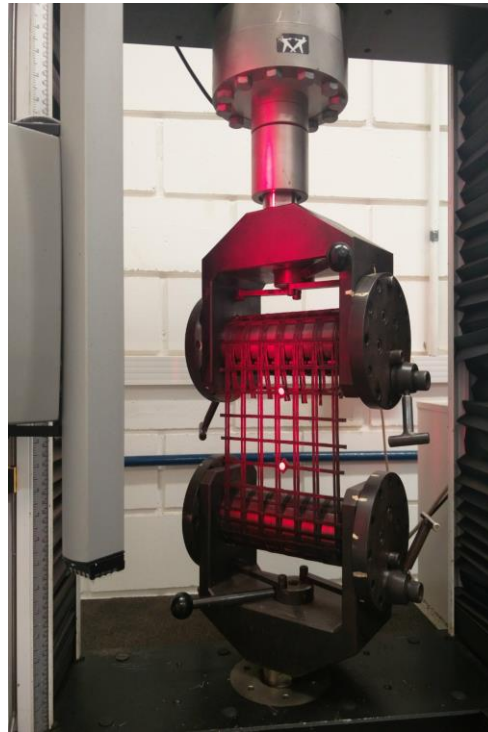
A compressibilidade obtém-se medindo a espessura em relação a um carregamento. A tensão varia

geralmente entra 10 e 200 kPa, podendo ser maior caso na aplicação a carga passe desse valor. Essa medida é importante em geotêxteis não tecidos agulhados onde esse valor costuma ser alto (SHUKLA, 2002).

Existem diferentes ensaios de resistência à tração unidirecional. O ensaio de tração consiste em prender o corpo de prova em duas garras metálicas de uma máquina universal de ensaio. Esse conjunto traciona o geossintético até uma determinada força ou à ruptura e registra esses valores (figura 1). Pode-se fazer o ensaio em faixa estreita (ASTM D5035, 2015; ISO 13934-1, 2013) em faixa larga (ABNT NBR ISO 10319, 2013; ASTM D4595, 2015). A diferença entre os dois tipos é que no primeiro, o comprimento do corpo de prova é menor. O problema do ensaio de tração de faixa estreita é o fenômeno de estricção, que consiste no estrangulamento da parte central do material, resultando em valores maiores de deformação e diminuição dos valores de ruptura. Portanto, para o dimensionamento o método de tração faixa larga costuma ser o mais confiável, embora a tração faixa estreita seja importante no controle de qualidade da indústria de geossintéticos e têxtil (BUENO; VILAR, 2004).

Outro tipo de ensaio de tração é o multidirecional. Basicamente esse ensaio consiste em um dispositivo que de alguma forma prende e gradualmente pressiona o material até seu estouro. Assim, mede-se a deformação em função da pressão aplicada. É um ensaio importante para geomembranas, que por serem impermeáveis, podem sofrer com pressão interna. Por exemplo em aterros, a atividade microbiana gera gases que, em células fechadas se expandem e podem romper a geomembrana. Para geossintéticos permeáveis, esse ensaio é feito, recobrindo-o com uma membrana flexível de pressão de ruptura conhecida, e mede-se o ponto de ruptura do conjunto (BUENO; VILAR, 2004).

Figura 1: Ensaio de tração em uma geogrelha.



Outro ensaio mecânico é o de puncionamento estático. Ele busca identificar o efeito de cargas localizadas no material que podem ocasionar perfurações no geotêxtil ou geomembranas quando em contato direto com grãos pontiagudos. O ensaio é feito com uma máquina universal que faz uma força vertical um pistão em contato com o geossintético fixado. Outro tipo de ensaio é o de puncionamento dinâmico, que consiste em um cone de 500g que é solto em queda livre por 50 cm, ocasionando um furo que é medido por outro tipo de cone padronizado, representando uma situação de campo em que se lança materiais diretamente sobre o geossintético.

O ensaio de propagação de rasgos em geossintéticos é um parâmetro usado para classificar os materiais em alguns casos, e não tão usado como parâmetro de projeto. A norma americana desse ensaio é a ASTM D4533 (2013), que mede a força para a propagação do rasgo. O ensaio é feito em uma máquina universal, com um corpo de prova trapezoidal com uma incisão de 12mm e o valor de força máxima é a resistência de propagação de rasgos.

Por fim o ensaio de fluência representa o escoamento sob cargas constantes a que os materiais são submetidos no campo em várias aplicações. O ensaio de fluência normatizado pela norma ABNT NBR 15226 (2006) consiste em fixar o material em suas extremidades de forma vertical e colocar uma carga e registra-se o deslocamento dos corpos de prova em variadas cargas ao longo do tempo, de até 1000 horas. Então se constrói curvas de fluência, e com essas, pode-se construir curvas isócronas, em

que se extrapola o valor da fluência para estimar a vida útil do material (BUENO; VILAR, 2004).

3.2.6 Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas são importantes em aplicações de geossintéticos para fins de filtração e drenagem. A filtração necessita transportar líquidos e reter sedimentos, já a drenagem necessita a passagem livre do líquido, com a mínima perda de carga. Os parâmetros de interesse são a permeabilidade, transmissividade e filtração.

A permissividade é a razão entre a permeabilidade vertical (normal) do geossintético (K_n) e a espessura do material (t). No geral os geotêxteis e os geocompostos drenantes costumam ter permissividade elevados, mas a compressão afeta a capacidade de permeabilidade normal. O ensaio desse parâmetro é feito com um dispositivo em que tubos são colocados em formato de “u” que escoam água em uma determinada pressão, estática ou variável, e se mede a quantidade de água vertida em um coletor.

A transmissividade reflete o produto entre a permeabilidade planar no geossintético e sua espessura. A compressão do material nesse caso também afeta a capacidade de conduzir líquidos. O ensaio é feito em uma canaleta que escoam em gradientes hidráulicos de 0,1 a 1 e uma força normal ao corpo de prova, 20 e 200 kPa.

Quanto a filtração, são dois fatores importantes, nos quais no campo dependem diretamente da curva granulométrica do solo, são elas a abertura de filtração e a abertura aparente. A primeira, trata-se do maior diâmetro do sedimento que possui mobilidade no geotêxtil ou geocomposto.

O ensaio de abertura de filtração pode ser feito de duas maneiras, uma delas a chamada “abertura francesa” trata-se de uma roda com extremidades nas quais se prendem um recipiente vazado, seguida do geotêxtil com o solo em cima, na parte de baixo da roda existe um reservatório de água. O sistema fica girando por 24 horas e, um a um, os corpos de prova são submergidos e emergidos em seguida, ocasionando a filtração. A fração do solo que passa pelo geotêxtil fica depositada no reservatório, e com ela se faz a curva granulométrica, encontrando o valor no qual diâmetro de 95% dos poros é menor.

A outra maneira de descobrir a abertura de filtração é o método “brasileiro”. Esse ensaio é feito com um conjunto de peneira, agitador, embaixo de um geotêxtil e solo, com um fluxo de água sobre pressão. O solo que passa pelo geotêxtil é analisado da mesma forma que do ensaio anterior.

Por último, o ensaio de abertura aparente. Esse ensaio se difere dos anteriores porque é feito a seco e com microesferas de vidro, de diâmetros 0,075 a 2,00 mm, em um equipamento usado para fazer ensaios de granulometria. Coloca-se o geotêxtil na parte de baixo da peneira, e as diferentes faixas de

diâmetro, da mais fina a mais grossa, chegam ao geotêxtil e com as esferas que atravessam o material é feita uma curva granulométrica em que se descobre a faixa de diâmetro da abertura (BUENO; VILAR, 2004).

3.2.7 Desempenho

Os ensaios de desempenho buscam simular situações de aplicações reais dos geossintéticos, então são diferentes variáveis avaliadas, como o solo, presença de água, relevo acentuado, diferentes pHs, radiações nucleares ou ultravioleta e danos de instalação.

O ensaio de resistência a deslizamentos na interface do geossintético busca avaliar os efeitos no material que o contato com as camadas de solo causa. Os ensaios podem ser feitos em plano inclinado ou em cisalhamento direto. O equipamento padrão desse ensaio consiste em uma rampa plana onde se coloca o geossintético e por cima uma caixa com o solo ou material de contato. Nessa configuração, a força normal é baixa, pois é causada unicamente pelo material na caixa, outros tipos de equipamento permitem colocar forças maiores.

A resistência à arrancamento é usada em materiais rígidos como geogrelhas. No ensaio aplica-se uma tração em uma extremidade de um geossintético recoberto de solo, medindo-se a força de arrancamento, deslocamentos ao longo da amostra e a tensão normal que é aplicada.

A tração confinada é testada para simular o comportamento em funcionamento. Materiais com boa compressibilidade costumam ter resistência a tração maior, em comparação com o ensaio padrão de tração, exemplo de materiais que se comportam assim são os geotêxtis não tecidos agulhados. Esse tipo de tração deve ser feito em um equipamento confinado o material com duas camadas de solo, evitando-se deslizamentos e mantendo uma força normal constante ao longo do material, os equipamentos para esse tipo de ensaio ainda não são consolidados.

A fluência confinada tem fundamentos similares a tração confinada. E também acontece o mesmo efeito em geossintéticos compressíveis de melhoria de desempenho em confinamento. Os equipamentos desse tipo são incomuns e voltados para a pesquisa.

A filtração longa de duração busca avaliar a filtração de um geossintético em conjunto com o solo de interesse. A avaliação é feita por meio do gradiente hidráulico.

Em relação aos ensaios de abrasão, instalação e resistência ao UV, seguem uma mesma lógica, de expor o material a uma condição adversa que pode ocorrer no campo, e avaliar a magnitude e efeitos do

estresse nos corpos de prova. O ensaio de abrasão busca avaliar o efeito de ciclos de lixamento, feito com lixas graduadas e sob base rígida, em ensaios mecânicos e hidráulicos. Já o ensaio de instalação, em uma caixa, geralmente de 300x300 m. Instala-se o geossintético e aplica-se cargas variadas, simulando o maquinário que irá andar sobre a área da obra, então realiza-se os ensaios mecânicos e hidráulicos (BUENO; VILAR, 2004).

Por fim, o ensaio de envelhecimento por UV, trata-se de expor o geossintético a esse tipo de luz, podendo ser exposto ao sol ou por meio de lâmpadas específicas, então realiza-se os ensaios convencionais. Esse tipo ensaio irá ser detalhado nos próximos tópicos.

3.3 Degradação de geossintéticos

Apesar dos polímeros serem materiais duráveis, a estimativa da vida útil e os efeitos do envelhecimento nos geossintéticos são parâmetros importantes em obras que dependem desses materiais. As etapas anteriores à instalação do geossintético já exigem alguns cuidados para evitar a modificação de suas propriedades. Além disso, o funcionamento do geossintético ao longo de sua vida útil pode sofrer processos que resultam na degradação deste.

A fase anterior à execução da obra exige cuidado na estocagem e preparação do solo que será base do material. É recomendável que durante a estocagem e transporte, mantenha-se a embalagem do produto intacta para o mínimo de contato com a atmosfera. Quando a estocagem ocorrer ao ar livre deve-se cobrir o material com uma lona preta de polietileno, a fim de proteger contra a radiação UV, umidade e possíveis contaminantes. Caso o contato direto for inevitável, é sugerido descartar as partes mais externas da bobina. A preparação do solo de base também é recomendada no sentido de remover possíveis contaminantes, quando presentes, por exemplo, solventes, lama e óleo, e remover objetos perfurantes como pedras grandes, galhos e raízes grandes (AGUIAR; VERTEMATTI, 2004).

Instalado o geossintético, ainda dois fatores devem ser considerados: a proteção superficial e o aterramento. A exposição superficial, como já mencionado, causa danos às mantas e a solução disso é a cobertura (KOERNER; LORD; HALSE, 1988), que pode ser feita por vegetação, concreto, entre outros. Vale ressaltar que no processo de concepção do projeto deve-se considerar possíveis efeitos que podem expor o material a luz solar, como erosão ou animais que escavam (HORNSEY; SERVICE, 2017), também algumas aplicações que podem implicar ficar exposto como bags de desaguamento ou geocontêineres usados para evitar erosão costeira (CARNEIRO; MORAIS; LOPES, 2018). Quanto ao

aterramento, os equipamentos como escavadeiras e tratores nunca podem andar diretamente sobre os geossintéticos, sendo recomendada entre 30 e 50 cm de cobertura, dependendo da resistência da base. (BUENO; VILAR, 2004).

Já na fase em que o geossintético está desempenhando suas funções é possível a ocorrência de degradação. Koerner, Lord e Halse (1988) elencam fatores responsáveis pela degradação *in situ* de geotêxteis basicamente são, mecânicos, químicos, biológicos, ambientais, além de efeitos sinérgicos desses fatores.

Os fatores mecânicos são aqueles que causam a degradação das propriedades mecânicas. O primeiro desse é a colmatação de sedimentos nos poros da manta, diminuindo a capacidade de drenagem dos geotêxteis e geocompostos com essa finalidade. Com a diminuição do fluxo líquido, ocorre um aumento da pressão acima do material sobrecarregando-o (KOERNER; LORD; HALSE, 1988). O segundo fator são as variações de tensão e relaxamento, essas são causadas por variações da carga a qual o geossintético está submetido, isso resulta na perda de estabilidade do reforço (KOERNER; LORD; HALSE, 1988). Geossintéticos em geral quando em contato com fluxo de líquidos e sedimentos os efeitos abrasivos são também um fator mecânico de degradação (DIAS; CARNEIRO; LOPES, 2017). Por fim outro relevante fator é a ocorrência de rasgos e perfurações nos materiais, pois esses alteram o comportamento desses (ROLLIN; LOMBARD, 1988).

Quanto os fatores químicos relacionados a degradação de geossintéticos, eles atuam reagindo e quebrando as cadeias poliméricas. Esse fenômeno se relaciona, principalmente, com lixiviados tóxicos, comuns em áreas de disposição de variados tipos de resíduos. Altos valores de pH são agressivos para poliéster, enquanto poliamidas são afetadas em ambientes com pH menor. Polipropileno e polietilenos costumam ser menos sensíveis à mudança de pH, embora o primeiro tenha a capacidade de ser oxidado. Outros elementos estão relacionados ao contato atmosférico, como contato com ozônio que causa a oxidação do polímero (KOERNER; LORD; HALSE, 1988).

O fator biológico de degradação dos materiais geotêxteis relaciona-se ao crescimento de culturas de microrganismos nos poros. As colônias de microrganismos promovem o entupimento do geotêxtil, com consequências análogas ao entupimento causados por sedimentos. Outro efeito são ataques ao polímero, geralmente causados por subprodutos do metabolismo celular, que podem interagir com os polímeros e mudar o pH do meio (KOERNER; LORD; HALSE, 1988).

Os fatores ambientais se relacionam à interação com a atmosfera, poluentes, radioatividade e

temperatura. Componentes da atmosfera têm o potencial para reagir com os geossintéticos, como o ozônio, que pode oxidar o polipropileno, e carregar poluentes como compostos sulfurosos que podem atacar os polímeros. A radioatividade ataca as cadeias poliméricas, afetando as propriedades mecânicas desses materiais (ROLLIN; LOMBARD, 1988) . Temperaturas extremas podem afetar as propriedades do material, altas temperaturas também favorecem reações químicas (SINGH; BOUAZZA, 2013) . Por fim a luz ultravioleta é percebida como um dos fatores mais importantes, e será aprofundada em seção posterior (KOERNER; LORD; HALSE, 1988).

Esses mecanismos de degradação *in situ* não operam de forma individual, eles agem em conjunto e alguns desencadeiam outros. Embora esses mecanismos sejam bem complexos por envolver uma ampla gama de fatores, já se investigou algumas interações de agentes de degradação em geotêxteis de polipropileno (CARNEIRO; MORAIS; LOPES, 2018)). Esses autores realizaram a imersão de geossintéticos em diversos químicos e seguido de envelhecimento acelerado por UV ou termo oxidação, com resultados expressivos de perda de resistência à tração. Algumas interações entre esses mecanismos também podem gerar efeitos benéficos, como a interação de resíduos químicos inibindo o crescimento de culturas de microrganismos nos geossintéticos (KOERNER; LORD; HALSE, 1988).

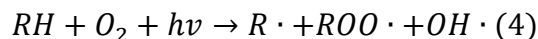
3.3.1 Degradação por radiação ultravioleta

A radiação solar é reconhecida como um dos principais fatores relacionados a degradação de polímeros em geral. Assim, os geossintéticos também são afetados em contato com essa fonte de energia. No caso dos geotêxteis não tecidos, esse efeito se agrava devido à grande superfície de contato, característica desses materiais. Além disso, à exposição de geossintéticos à luz solar soma-se fatores ambientais como a variação de temperatura, umidade, entre outros fatores, que aceleram os processos de decomposição polimérica (KOERNER; HSUAN; KOERNER, 1986).

A luz solar abrange vários comprimentos de onda, do infravermelho (>700 nm), do espectro visível (entre 700 e 400 nm) e o ultravioleta (<400 nm) chegando até aproximadamente 300 nm dependendo das condições atmosféricas. Quando um geossintético é exposto a essa radiação solar, os fótons de energia maior ou igual à das ligações químicas do polímero podem levar a quebra das cadeias poliméricas e eventual alteração de suas propriedades físicas, mecânicas e químicas (SUITS; HSUAN, 2003).

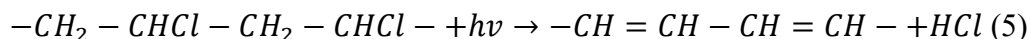
3.3.1.1 Mecanismos de degradação

A degradação por luz solar ou ultravioleta nos polímeros não é regida sempre pelo mesmo mecanismo, variando de acordo com o material. No polipropileno e polietileno ocorre o processo de foto oxidação (equação 4) (SUITS; HSUAN, 2003) .



Onde RH é a cadeia polimérica e h e ν , respectivamente, são a constante de Planck e ν o comprimento de onda. Essa reação resulta na quebra da cadeia e gera um composto com o grupo funcional carbonila.

No PVC ocorre a eliminação de ácido clorídrico e a formação de uma cadeia polimérica com ligações duplas conforme a equação 5:



Onde $-CH_2 - CHCl - CH_2 - CHCl -$ é a cadeia de PVC, h e ν , respectivamente, são a constante de Planck e ν , o comprimento de onda (SUITS; HSUAN, 2003).

Para o poliéster tereftalato (PET) em contato com UV a degradação ocorre com a quebra da cadeia, formando o grupo carboxila. Nas Poliamidas (PA) a degradação depende do comprimento da onda. Em comprimentos de onda maiores que 300 nm, predomina a quebra da cadeia, enquanto em comprimentos menores que 300 nm, a ligação cruzada é mais influente na degradação (SUITS; HSUAN, 2003).

Para amenizar os efeitos da radiação UV nos polímeros são adicionados compostos que os protegem da luz e da oxidação. O negro do fumo é um dos principais aditivos usado em polímeros. Trata-se de particulado de carbono agregado na superfície do material, protegendo-o de forma mecânica, absorvendo a radiação. Nos geotêxteis geralmente utiliza-se partículas da ordem de 22-25 nm de diâmetro. Quanto menor o tamanho da partícula, maior a proteção ao UV devido a maior área de contato com a radiação. Considera-se que a partir de 20 nm para menos, o valor de absorção da radiação UV

tende a aumentar muito (SUITS; HSUAN, 2003).

Outros tipos de aditivos com a mesma finalidade são os *UV screeners* e os antioxidantes, que são químicos que, respectivamente, absorvem a luz UV e liberam em formas inofensivas de calor. Um exemplo de screener é o TiO₂ ou compostos orgânicos. E por fim os antioxidantes, menos comum nos geossintéticos, que são aditivos que evitam reações em cadeias dos radicais livres, dependendo do tipo de mecanismo oxidação e reação (SUITS; HSUAN, 2003).

A combinação dos aditivos com o negro de fumo resulta em geossintéticos com boa resistência ao dano por radiação UV, entretanto há um risco ambiental. Alguns desses aditivos têm efeitos ecotoxicológicos, podendo contaminar indivíduos de espécies aquáticas e terrestres. Quanto aos outros, ainda nem se sabe o efeito no meio ambiente. Outra preocupação é a liberação de micropartículas de polímero que podem atingir esses mesmos seres vivos (WIEWEL; LAMOREE, 2016)

3.3.1.2 Envelhecimento por UV

Existem técnicas para o chamado envelhecimento por UV, não só para geossintéticos, mas para outros tipos de materiais como pinturas e revestimentos. Esses métodos podem ser naturais ou acelerados, dependerem da luz do sol ou artificiais (lâmpadas que conseguem emitir os comprimentos de onda do espectro ultravioleta).

O método de exposição ao ar livre é o mais simples, no qual o material fica exposto ao sol, e a outras intempéries. A norma que rege este teste é a ASTM D5970 (2017), a qual indica que os geotêxteis, ou outros geossintéticos, devem ser fixados em painéis de madeira envernizados a um ângulo de 40 graus em direção ao sul, considerando que no caso se refere à direção com a maior radiação solar do hemisfério norte. Essa mesma norma sugere que se façam amostras para 1, 2, 4, 8, 12 e 18 meses. Além da radiação, outros fatores que influenciam nesse ensaio são as variações de temperatura, contato com poluentes presentes no ar e na chuva, e as condições atmosféricas. A vantagem desse método é sua simplicidade que permite ser feito no local em que o geossintético será aplicado. Em contrapartida, exige muito tempo e é influenciado por diversos fatores aleatórios que podem ser difíceis de se identificar e controlar.

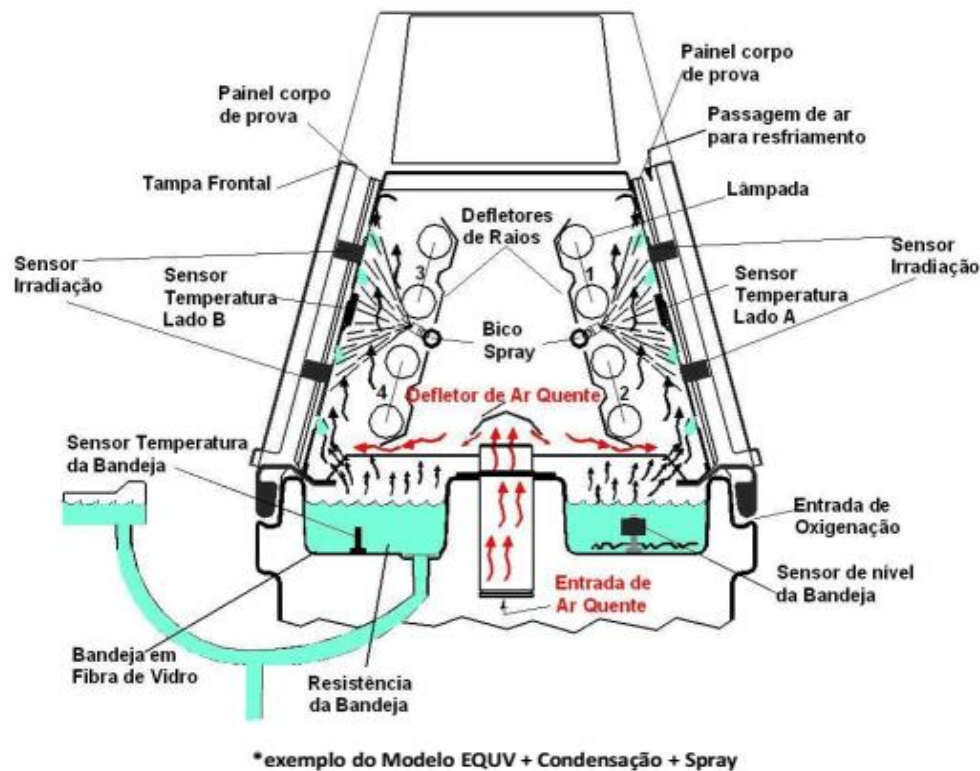
3.3.1.3 Envelhecimento acelerado

Os métodos de envelhecimento acelerados, por sua vez, usam câmaras com lâmpadas que emitem a radiação do espectro ultravioleta. Basicamente existem três tipos de câmara que se diferenciam no tipo de lâmpada, arco Xênon, arco carbono e fluorescentes, essa última usada na presente monografia. Ambas têm características similares, funcionam sob ciclos de condensação e radiação programados dependendo das necessidades a serem ensaiadas (MILAGRES, 2016) . Acredita-se que as câmaras com lâmpadas arco xênon e arco carbono sejam mais agressivas em relação aos dispositivos com lâmpadas fluorescente (KOERNER; HSUAN; KOERNER, 1986). A figura 2 mostra a configuração de uma câmara UV padrão.

O método de envelhecimento acelerado tem a vantagem de usar um menor tempo de ensaio e ter um controle maior das condições de radiação, temperatura e umidade. Entretanto, a desvantagem seria justamente a dificuldade de correlação com as condições naturais de intemperismo (SUITS; HSUAN, 2003) .

Por fim existe outro sistema de intempéries acelerada com exposição ao ar livre. Esse sistema chama-se concentrador solar de Fresnel (FSC) e baseia-se em espelhos curvos que concentram a luz do sol para uma área de exposição em que se posiciona os geossintéticos. A luz concentrada tem uma intensidade oito vezes maior do que a do sol e os espelhos seguem a direção do sol ao longo do dia de forma automatizada. Assim como as câmaras de envelhecimento, utiliza de fases de spray e condensação. O FSC é experimental tendo registro de existir apenas em um local no estado do Arizona -EUA, devido ao seu alto custo (SUITS; HSUAN, 2003).

Figura 2: Esquema do funcionamento de uma câmara de envelhecimento acelerado por UV



Fonte: Equilan (2017)

3.3.2 Pesquisas na área

KOERNER, HSUAN e KOERNER, (1986) avaliaram a fotodegradação em geotêxteis não tecidos agulhados de PET e PP com diferentes tipos de estabilização, os envelhecimentos a campo foram feitos nos estados do Texas, Pensilvânia e Carolina do Sul, e os envelhecimentos acelerados 500 horas por UV e Arco Xênon e Carbono. Tal trabalho encontrou uma tendência de perda de resistência mecânica, dependendo da espessura do material, tipo de polímero, tratamento e condições de degradação. Também concluí que o envelhecimento arco xênon é mais agressivo em comparação ao UV.

KOERNER, LORD e HALSE (1988) elencaram fatores associados a degradação de geotêxteis, dos quais a radiação UV é uma das grandes responsáveis, sugerindo estudos aprofundados dessas causas.

KOERNER, LORD e HSUAN (1992) sugeriram o método de Arrhenius para quantificar a velocidade de degradação dos geotêxteis e estimativa de vida útil desses, visto que a temperatura e energia absorvida são relacionados a degradação dos polímeros.

Barker (1997, APUD SUITS; HSUAN, 2003) fez um dos primeiros estudos correlacionando o ensaio

acelerado por Arco Xênon e exposição a natural no estado da Florida. O autor aponta que a temperatura de incubação do dispositivo é um fator mais influente que radiação, assim, o fator temperatura deve ser considerado para a correlação. Na mesma linha de pesquisa SUITS e HSUAN, (2003) estudaram a fotodegradação de geotêxteis de PET e PP usando envelhecimento natural, UV e arco Xênon, confirmando a importância da temperatura na correlação campo e acelerado.

LODI (2003) foi um dos pioneiros dessa linha de pesquisa no Brasil, em sua tese ele avaliou fatores de degradação de geomembranas. LODI et al (2008) também encontraram a diminuição das propriedades mecânicas em geotêxteis não tecidos expostos a intempéries por 1 a 4 meses.

MILAGRES (2016) estudou a degradação de geotêxteis tecidos, tanto por ensaio acelerado por UV e exposição a intempéries de PP e PET, e em ambos a autora encontrou uma tendência de perda de resistência mecânicas desse tipo de geotêxtil.

3.4 Calorimetria exploratória diferencial

A calorimetria exploratória diferencial (DSC, sigla do inglês *differential scanning calorimetry*) é uma técnica termoquímica, usada para investigar a resposta de materiais a fluxos de energia, seja calor ou resfriamento. Em polímeros, esse método é bastante usado para a avaliação da capacidade calorífica, ponto de fusão, transição vítrea, e cristalinidade (IONASHIRO, 2004).

O equipamento consiste em uma câmara onde ocorre o experimento e o computador que controla e registra os dados. Dentro da câmara existem dois cadinhos, um deles onde o material a ser testado é colocado, e o outro, que sempre fica vazio, serve como referência para o equipamento. Os resultados são gravados e sistematizados pelo computador, sendo apresentados os resultados em gráficos de fluxo de calor (W/g) versus temperatura (°C) (CANEVAROLO JR., 2009).

Os tipos de equipamentos mais comuns de DSC são os de fluxo de calor e de compensação de potência. O DSC de fluxo de calor, basicamente, funciona aquecendo os cadinhos metálicos por uma única fonte, a diferença entre esses é convertida a uma diferença de potência que reflete na diferença no fluxo de calor. Já o DSC de compensação de potência funciona aquecendo dois cadinhos de forma separada, as fontes de calor são programadas para se comportar de forma igual, por controladores elétricos (BERNAL et al., 2002).

O equipamento de DSC aquece o material seguindo uma rampa de aquecimento conforme os cinco ciclos. Quando não ocorre a mudança de estados, o equipamento consegue aquecer seguindo uma certa

linearidade, então a curva se aproxima de uma linha horizontal, mas quando ocorre uma mudança de estado, o equipamento aumenta a potência para compensar a mudança de estado. (BERNAL et al., 2002)

A capacidade calorífica do material é a quantidade de energia necessária para elevar a temperatura do material em 1 grau. A representação gráfica de um trecho de aquecimento, relacionado com a capacidade calorífica, sem a mudança de estado físico, costuma ser uma reta. (BERNAL et al., 2002)

O ponto de fusão, trata-se da temperatura em que o material modifica do estado sólido para o líquido. Trata-se de um processo endotérmico, ou seja, absorve calor. Em materiais puros essa temperatura é constante até a total mudança de estado físico. A quantidade de energia necessária para a transição de estado físico é chamada calor latente e como dito anteriormente, fica em uma temperatura constante até a mudança de estado.

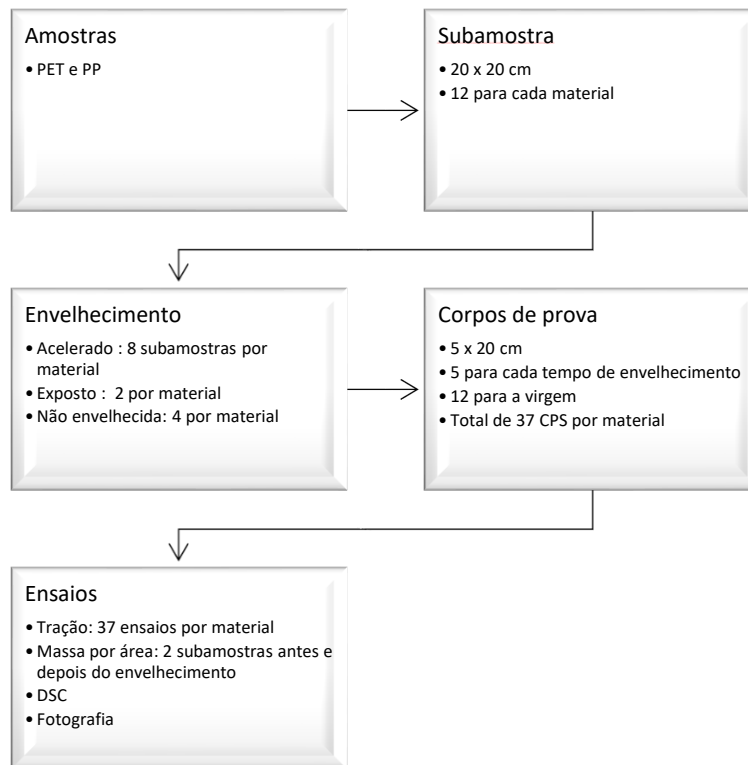
A transição vítrea acontece quando o polímero derretido é resfriado até determinado ponto. No ponto de transição vítrea os polímeros mudam sua propriedade de elasticidade e maleabilidade para uma forma quebradiça. A capacidade calorífica geralmente é maior após a transição vítrea.

Acima da transição vítrea, as moléculas poliméricas têm uma grande energia, permitindo que elas se reorganizem de forma ordenada (fase cristalina). A cristalização é um processo exotérmico, liberando calor. Quanto maior for o grau de cristalização do polímero, melhores são suas propriedades mecânicas.

4 Materiais e métodos

A presente seção abordará os procedimentos e métodos utilizados. Em suma foram duas amostras de geotêxteis não tecidos agulhados, um de PET e outro de PP, que foram envelhecidos em 250, 500, 750 e 1000 horas em câmara UV com lâmpadas UVA-351. Com as amostras envelhecidas e uma outra de controle, foram feitos ensaios de tração faixa estreita, massa por unidade de área e DSC. Paralelamente, fotografou-se em um mesmo corpo de prova as fibras externas ao longo do tempo, sendo envelhecido em conjunto com as amostras. O esquema a seguir, figura 3, ilustra as etapas do experimento.

Figura 3: Etapas experimentais.



4.1 Preparação dos ensaios

As amostras foram cortadas em subamostras de tamanho 20 por 20 cm em um espaço restrito das bobinas. Essa opção de preparação de amostra se diferencia da norma brasileira (ABNT NBR ISO 9862,2013), que sugere que os corpos de prova (CP) sejam feitos de forma espaçada, nesse experimento buscou-se uma homogeneidade do material, ao contrário da norma que tem como motivo buscar as variações do material ao longo de seu comprimento.

Foram cortados 50 subamostras, de 400 cm², para cada material e acondicionadas em ambiente de temperatura e umidade controlados durante 24 horas. As subamostras foram pesadas antes do envelhecimento. Quatro dessas subamostras, para o PET e PP, foram cortados em corpos de prova, conforme a norma ASTM D 5035 (2015), na largura de 5 cm por 20 de largura, para o ensaio de tração de faixa estreita, sendo a amostra de controle, totalizando 12 ensaios do material virgem. A figura 4 mostra um exemplo de subamostra e corpo de prova.

Figura 4: Subamostra e corpo de prova



Duas subamostras de cada material, PET e PP, e tempo de exposição, 250,500,750 e 1000 horas, foram colocadas no dispositivo de envelhecimento ultravioleta, totalizando 16 envelhecidos. Quando se chegou no tempo de exposição, os mesmos procedimentos foram feitos com as amostras envelhecidas, resultando em 6 corpos de prova 5 x 20 cm para cada material e tempo de exposição, dos quais apenas 5 cinco foram usados para o teste de tração e o outro ficou de reserva em caso de algum problema durante o ensaio de tração. No total foram feitos 6 corpos de prova, para cada um dos tempos de envelhecimento, totalizando 30 para cada material, das quais 25 foram usadas para os ensaios de tração.

4.2 Envelhecimento UV

O equipamento utilizado para o ensaio acelerado foi o EQUILAM EQUV série 003, com lâmpadas UVA-351. Seguiu-se a norma ASTM D 7238 (2017), programou-se um ciclo de 8 horas de radiação, a uma temperatura de 70 °C por 4 de condensação, a 50 °C. A figura 6 mostra o equipamento utilizado.

Figura 5: Câmara de envelhecimento UV



Os corpos de prova foram posicionados nas grades do equipamento de envelhecimento acelerado conforme a figura 7. Para uma melhor vida útil das lâmpadas optou-se por otimizar o tempo de funcionamento do equipamento, totalizando 1000 horas ligado. Quatro amostras de 1000 horas (duas de PET e duas de PP) ficaram na totalidade do envelhecimento. As quatro amostras de 750 horas, depois do tempo de incubação, foram trocadas por as de 250 horas. Quanto as amostras de 500 horas, duas subamostras de PET foram incubadas primeiro sendo substituído posteriormente pela de PP.

Figura 6: Amostras posicionadas na câmara.



Quanto ao envelhecimento por exposição, foi feito próximo ao laboratório de geossintéticos e departamento de geotecnia da Universidade de São Paulo, campus São Carlos ($22^{\circ} 0' 55''$ Sul, $47^{\circ} 53' 28''$ Oeste), durante um tempo de 6 meses, do dia 23 de fevereiro, até 23 de agosto. A figura 8 mostra o ensaio de campo sendo realizado.

Figura 7: Subamostras expostas a intempéries.



4.3 Ensaio de tração faixa estreita

Com os geotêxteis envelhecidos e as amostras virgens foram preparados os corpos de prova para o ensaio de tração. Então cortou-se os corpos de prova na medida de 5 por 20 cm, a chamada faixa estreita, resultando em três corpos de prova e descartou-se 2,5 cm das bordas. O sentido da tração ensaiada foi, longitudinal.

O teste de faixa estreita foi escolhido basicamente pelo reduzido número de subamostras degradadas e desse teste ter características qualitativas. O material envelhecido na câmara era limitado a duas subamostras por tempo de degradação por material, que resultava em 6 corpos de prova, caso o teste usado fosse o de tração faixa larga, resultaria em 2 corpos de prova. Também se considerou que esse tipo de teste é mais voltado para a comparação e testes de qualidades de produtos têxteis.

Como já citado, esse tipo de ensaio de tração faixa estreita tem o efeito adverso da estricção, ou seja, o estrangulamento da parte do meio do corpo de prova mostrado na figura 9, resultando uma maior resistência, sendo impraticável em situações que o valor de tensão de ruptura é necessário para o dimensionamento do geotêxtil. Nesse caso, se busca comparar o efeito do envelhecimento na resistência à tração.

Figura 8: Estricção (estrangulamento) da parte do corpo de prova tracionado.



O ensaio de tração foi feito com uma máquina universal EMIC com garra pneumática e célula de 3 toneladas, mostrada na figura 10, o método utilizado seguiu a norma internacional ASTM D5035 (2015). Seguindo o procedimento, posicionou-se o material na garra, aplicou-se uma pré carga e iniciou-se a tração até a ruptura. O equipamento utilizado registrou os dados e forneceu o gráfico da força versus o alongamento de cada corpo de prova, assim como foi fornecida a força máxima de ruptura, deformação específica, força máxima pela largura do corpo de prova, e outros quatro pontos da curva plotada, sendo esses quatro, os pontos nos quais a deformação específica são respectivamente 5, 10, 15, e 20 por cento da deformação específica.

Figura 9: Máquina universal utilizada nos ensaios de tração.



Com a unidade de força no momento da ruptura por milímetro do corpo de prova, realizou-se testes de hipóteses, comparando estatisticamente a diferença dos resultados entre os diferentes tempos de envelhecimento acelerado.

4.4 Massa por unidade de área

Com as subamostras de 20 por 20 cm, pesou-se a massa dos materiais em uma balança. Foi realizado com as amostras virgens e envelhecidas, buscando obter possíveis mudanças de massa entre os intervalos de envelhecimento

4.5 DSC

O equipamento utilizado foi um DSC de fluxo de calor, da TA instruments modelo Q-20, mostrado na figura 11. Faixa de temperatura para o PET e PP foram, respectivamente, 25 a 300 °C e 25 a 200 °C. A rampa de aquecimento de ambos foi 10 °C/min. A atmosfera usada foi de nitrogênio com um fluxo de 20 ml/min. A massa utilizada nesse ensaio foi cerca de 7 mg por teste, sendo feito para ambos materiais virgens, envelhecidos por 1000 h no equipamento de envelhecimento acelerado por UV e para os

expostos a intempéries durante 6 meses.

Figura 10: Equipamento DSC utilizado.



4.6 Registro fotográfico

Paralelamente ao envelhecimento acelerado, dedicou-se uma amostra para verificar visual e qualitativamente os efeitos superficiais desse processo em uma região determinada do material geotêxtil. Para cada material e tempo de exposição foram tiradas fotos usando uma lupa e uma máquina fotográfica, totalizando 4 fotos (cinco para cada material), uma virgem e outras respectiva aos tempos de exposição de 1000 horas e 6 meses em campo.

4.7 Tratamento dos dados

Com os dados da tração, aplicou-se o teste hipóteses com a distribuição t de Student para comparar o envelhecimento das amostras ao longo dos tempos de exposição. Os cálculos foram realizados no software Microsoft Excel 2016 em sua ferramenta de análise de dados, com a função “Teste-t duas amostras presumindo variâncias diferentes”.

As hipóteses dos testes são as seguintes:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Onde H é a hipótese, e μ é a média de cada conjunto, assim a primeira hipótese trata de as médias serem estatisticamente iguais e a segundo, serem diferentes, portanto nesse caso havendo a degradação.

Outro parâmetro calculado é o t (chamado pelo software que fez os cálculos de $t-stat$), que quando maior que zero, pode-se considerar que:

$$T > 0, H_1: \mu_1 > \mu_2$$

E a recíproca também é verdadeira quando o valor do t é menor que zero:

$$T < 0 H_1: \mu_1 < \mu_2$$

Então calcula-se o nível descritivo $P(T \leq t)$, ou também chamado, α_d crítico, caso ele seja maior que 0,05 (nível de significância ou α), em um intervalo de confiança de 95%, H_0 é descartado, caso contrário ainda é preciso verificar o fator t crítico, presente na tabela de t-student. Se t for maior que t -crítico a hipótese H_0 é rejeitada, se não for a hipótese das medias iguais é aceita (MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C., 2009).

Os resultados geram resultados unicaudais e bicaudais, isso refere-se ao intervalo da distribuição olhada. O unicaudal analisa os intervalos do desvio da media apenas para valores maiores. O Bicaudal analisa valores maiores e menores de desvio no intervalo. Nesse trabalho o resultado bicaudal foi analisado.

5 Resultados e discussão

5.1 Massa por área

O primeiro resultado obtido foi a massa por unidade de área, antes e depois do processo de envelhecimento. A Tabela 1 apresenta os resultados do PET, enquanto a Tabela 2, os do PP:

Tabela 1: Resultado da massa por área do geotêxtil de PET.

Exposição	Antes do envelhecimento (g/m ²)	Pós envelhecimento (g/m ²)	Diferença pós envelhecimento (%)
6 meses	530,5	537,00	1,23
6 meses	545,00	551,75	1,24
1000 h	516,25	515,00	-0,24
1000 h	522,75	522,25	-0,10
750 h	516,25	515,25	-0,19
750 h	519,25	517,25	-0,39
500 h	528,50	528,50	0,00
500 h	515,00	514,25	-0,15
250 h	512,75	512,5	-0,05
250 h	465,00	465,00	0,00

Tabela 2: Resultado da massa por área do geotêxtil de PP.

Exposição	Antes do envelhecimento (g/m ²)	Pós envelhecimento (g/m ²)	Diferença pós envelhecimento (%)
6 meses	456,25	464,50	1,81
6 meses	405,25	413,25	1,97
1000 h	496,25	495,50	-0,15
1000 h	461,500	459,25	-0,49
750 h	452,00	450,25	-0,39
750 h	436,5	434,75	-0,40
500 h	407,75	406,75	-0,25
500 h	494,25	493,00	-0,25
250 h	420,50	419,50	-0,24
250 h	421,50	421,25	-0,06

Nota-se que a massa por área do PET pouco varia nos tempos de menor envelhecimento. Os corpos de provas de 250 horas perderam, em média 0,125 g/m² e os 500 horas, 0,375 g/m². Os CPs de 1000 horas variaram em média 0,875 g/m² enquanto para CP de 750 horas 1,5 g/m².

Em relação ao polipropileno, nota-se que houve uma alteração em todas as amostras envelhecidas.

A amostra de 1000 horas, em média perdeu 1,5 g/m², assim como no PET o envelhecimento 750, teve uma média maior que 1,75 g/m². Os envelhecidos em 500 e 250 horas tiveram, respectivamente, as médias de 1,125 g/m² e 0,875 g/m².

No caso das amostras envelhecidas no painel ao ar livre, nota-se o aumento da massa. Isso certamente é devido a partículas de poeira que foram se depositando nos materiais. Mesmo removendo a camada superficial desse particulado, parte dele se depositou dentro do material.

Esses resultados, sugerem uma possível alteração do material. Uma possibilidade seria a reação dos antioxidantes presentes nos polímeros agindo e se separando das amostras nos períodos de condensação do envelhecimento. Ainda nota-se uma maior suscetibilidade do PP de perder massa do que o PET. Considerando que essa diminuição da massa foi causada pela degradação do polímero, ou de aditivos que são consumidos, está de acordo com a literatura, que considera o PP mais reativo em contato com o ultravioleta e mais susceptível a oxidação, que entre os efeitos pode quebrar a cadeia do polímero e se desagregar do material (BUENO, 2004).

Outro efeito notável é a maior perda de massa nas amostras de 750 horas, em ambos casos. À primeira vista isso talvez se explica pela posição e uma possível diferença entre as lâmpadas UV, mas isso não se confere devido a mudança do posicionamento das amostras dentro da câmara. Portanto uma possível explicação seria uma fase em que o polímero degradado ainda teria sido estabilizado, então ao retirar do ensaio, os corpos de prova perderiam essas partículas, diminuindo a massa. Ainda assim o número de amostras ainda é pequeno para um resultado conclusivo sobre causas dessa diminuição percebida.

5.2 Resistência a tração

Os resultados dos ensaios de tração do tipo faixa estreita estão resumidos, tanto para o geotêxtil de PET quanto para PP, nas tabelas 3 e 4, respectivamente. O resultado completo dos ensaios está presente nos apêndices 1 a 10. Eles contêm os valores individuais para cada período de envelhecimento e todos corpos de prova, além disso, apresentam valores das trações nas deformações 5, 10, 15 e 20%.

Tabela 3: Resultados médios obtidos nos ensaios de resistência a tração faixa estreita, com os respectivos desvios padrão para o geotêxtil de PET

Tempo (horas)	Força Máxima média (N/mm)	Desvio padrão força média (N/mm)	Deformação máxima (%)	Desvio padrão da deformação máxima (%)
0	13,89	0,26	74,55	4,44
250	11,48	0,72	69,94	5,32
500	12,74	0,51	72,07	4,47
750	11,16	0,16	74,08	2,11
1000	11,96	0,65	75,12	3,06
6 meses (a campo)	13,48	1,4	57,42	7,02

Tabela 4: Resultados médios obtidos nos ensaios de resistência a tração faixa estreita, com desvios padrão para o geotêxtil de PP

Tempo (horas)	Força Máxima média (N/mm)	Desvio padrão da força média (N/mm)	Deformação máxima (%)	Desvio padrão da deformação máxima (%)
0	19,7	2,07	61,38	2,71
250	20,43	0,95	59,93	3,55
500	19,63	2,48	54,77	1,91
750	17,9	0,78	52,78	2,28
1000	19,27	1,77	52,69	2,62
6 meses (a campo)	16,1	0,65	41,29	3,62

Com as médias dos resultados e as respectivas deformações e os valores dos pontos relativos a 5, 10, 15 e 20 % da deformação foram elaboradas curvas comparando os resultados médios da tração as figuras 12 e 13, apresentam respectivamente, para o PET e PP. Nos últimos pontos das curvas, relativo à deformação média e força média na ruptura, colocou-se a barra indicando o desvio padrão de cada amostra.

Figura 11: Trações médias com suas respectivas deformações específicas da amostra PET

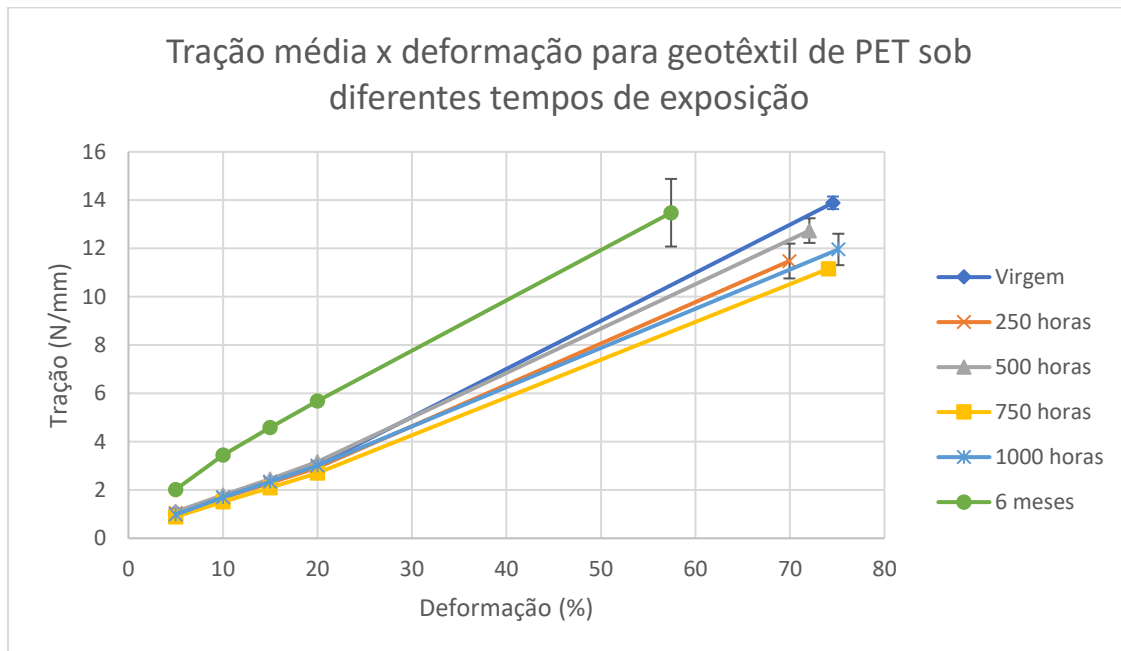
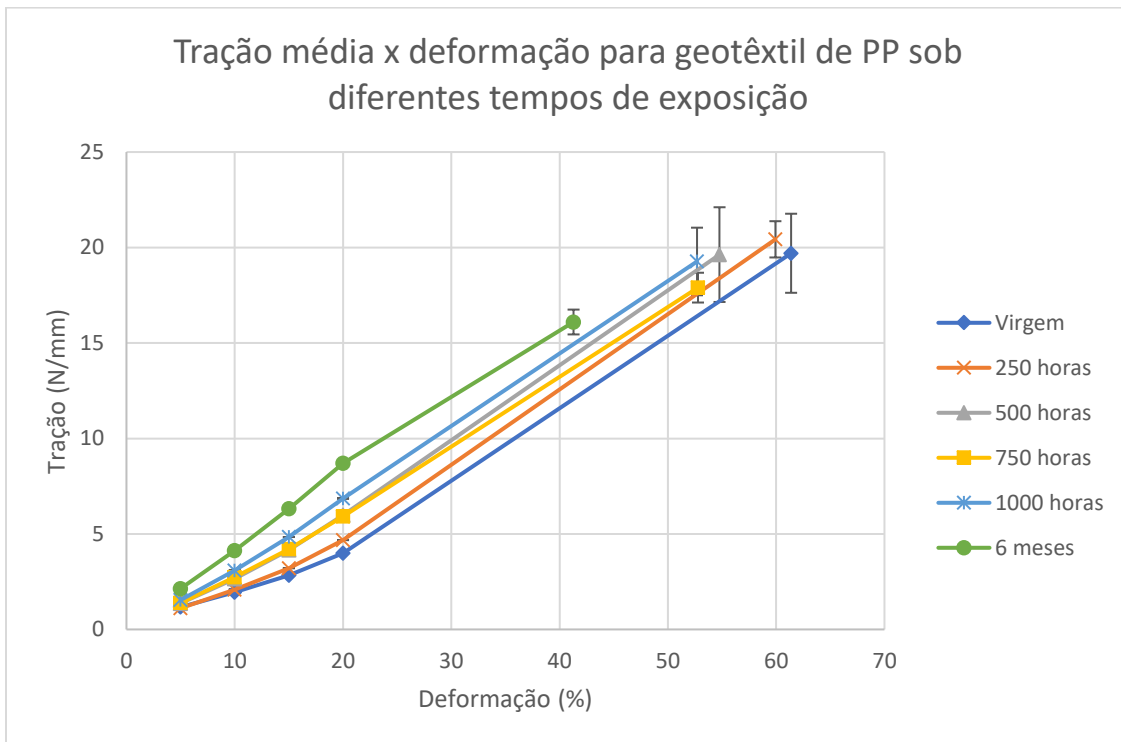


Figura 12: Trações médias com suas respectivas deformações específicas da amostra PP



A figura 12 mostra um decréscimo da última força em relação às amostras virgens para o geotêxtil feito de PET. As amostras não envelhecidas se destacam, no ponto de ruptura, por resistir a uma tração média superior do que as outras em quase 20%, tendo em média uma redução de 4% por tempo

envelhecido. Em contrapartida, não indicaram uma relação linear de degradação, pois esperava-se que a amostra de 250 horas fosse a segunda mais resistente e a de 1000 horas a com menor resistência. Mesmo assim, considerando o desvio das amostras envelhecidas estão próximos. Essa observação sugere uma possível limitação da degradação, nas condições dos ensaios, existindo uma estabilização da degradação conforme o tempo, ou seja, tempos de ensaios acelerados maiores talvez não tenham resultados proporcionais ao tempo. A deformação não mostrou um padrão nesse material para os ensaios acelerados.

Em relação aos corpos de prova de PET envelhecida no painel ao ar livre durante 6 meses nota-se uma tendência diferente das envelhecidas em ambiente controlado. A mais notável é a perda de deformabilidade em uma ordem de grandeza de 12%. Possivelmente algum fator ambiental não presente nos testes acelerados pode estar causando essa queda, tais como ataques químicos de partículas atmosfera. Quanto à resistência a tração, não é possível correlacionar com os ensaios acelerados apenas com a observação da figura 12, devido ao grande desvio entre os cinco corpos de prova.

O polipropileno, na figura 13, mostra tendências diferentes. A principal delas é a redução média da deformabilidade, onde se observa uma diminuição gradativa dessa propriedade, exceto pelo intervalo grande entre a amostra de 250 horas e de 500 horas. Nessa mesma propriedade, aparentemente ocorre uma estabilização da deformabilidade conforme o envelhecimento. Koerner et al. (1992), afirma que a deformabilidade é uma propriedade que se relaciona com a fragilidade das fibras, que adquirem a tendência de se fragmentar, embora nesse caso não consiga se relacionar com a força máxima. Em relação a força máxima os envelhecimentos têm, em média, valores próximos, mas devido à grande variabilidade das amostras é necessário um tratamento de dados mais profundo para confirmar se, nesse espaço amostral ocorre a diminuição da força máxima.

O resultado dos corpos de provas expostos as intempéries de polipropileno mostram uma nítida degradação. Tanto a tração média e a deformabilidade máxima caíram, a primeira em uma ordem de 20% da resistência, já a deformabilidade caiu cerca de 11% em relação as amostras envelhecidas mais de 750 horas, e 20 % do PP intacto. Tais resultados confirmam a maior suscetibilidade a degradação do PP ao UV, com as condições de campo esse processo se intensifica.

Como se esperava os materiais exibiram diferentes comportamentos entre si e em relação os envelhecidos. Para o PET os valores médios de resistência a tração caíram nitidamente, enquanto para o PP as medias não mostraram isso. O inverso ocorre na deformabilidade, onde o PET não mostra valores significativos de alteração (exceto a amostra que ficou 6 meses em campo) enquanto o PP mostrou. Todavia, a simplicidade do processo de fabricação dos geotêxteis não tecidos agulhados, causa uma considerável variabilidade das características dos materiais ao longo de seu comprimento, diferente por

exemplo de geomembranas ou geotêxteis tecidos. Dessa forma será feita análises estatísticas para confirmar a mudança, entre as amostras possíveis, se houve a degradação esperada conforme os tempos de envelhecimento.

5.3 Análise estatística das amostras

Nessa seção, os dados a serem analisados serão os relativos a força máxima, devido à dificuldade de obtenção, de forma objetiva, da resposta se no conjunto ocorre ou não a diminuição dessa propriedade mecânica ao longo do tempo, causada pela grande variabilidade das propriedades ao longo do material. O teste escolhido para tal análise é o teste t (t de Student), que compara as medias das populações, considerando amostras e variâncias independentes.

Foram feitos testes comparativos entre os conjuntos de amostra. Os dados utilizados para tais testes, respectivamente, PET e PP, estão apresentados nas tabelas 5 e 6. Vale ressaltar que os corpos de prova nas mesmas linhas são independentes, visto que o ensaio de tração pode ser realizado apenas uma vez por amostra.

Tabela 5: Resultado da tração máxima de cada amostra do geotêxtil de PET.

Tração de ruptura (N/mm)						
Corpo de prova	Virgem	250 h	500 h	750 h	1000 h	6 meses
1	14,43	10,59	12,68	11,37	12,12	15,01
2	12,8	12,18	13,1	11,03	12,6	13,62
3	15,31	10,72	12,43	11,2	12,33	15,01
4	15,44	11,61	12,02	11,26	12,02	11,95
5	14,1	12,32	13,48	10,92	10,72	11,82
6	14,12	-	-	-	-	-
7	13,48	-	-	-	-	-
8	13,21	-	-	-	-	-
9	13,51	-	-	-	-	-
10	13,65	-	-	-	-	-
11	13,62	-	-	-	-	-
12	12,97	-	-	-	-	-

Tabela 6: Resultados da tração máxima de cada amostra do geotêxtil de PP

Tração de ruptura (N/mm)						
Corpo de prova	Virgem	250 h	500 h	750 h	1000 h	6 meses
1	16,45	19,59	16,91	18,44	17,88	15,71
2	18,25	21,97	19,15	17,18	17,66	16,32
3	18,74	21,12	17,35	16,98	18,14	15,69
4	18,74	19,87	23,56	17,58	20,54	17,28
5	17,39	19,61	21,2	19,32	22,14	15,52
6	20,61	-	-	-	-	-
7	19,14	-	-	-	-	-
8	20,97	-	-	-	-	-
9	23,29	-	-	-	-	-
10	23,29	-	-	-	-	-
11	18,57	-	-	-	-	-
12	21	-	-	-	-	-

A tabela 7 mostra os resultados do teste t entre a amostra não degradada e a primeira amostra retirada da câmara UV. Temos que t é maior que 0, logo a hipótese 1 é que a média do primeiro conjunto pode ser maior que a do segundo. Nesse caso observa-se que $\alpha_d < \alpha$, portanto, com uma confiança de 95% podemos afirmar que a hipótese H_0 não é válida, então a média da amostra virgem é maior do que a envelhecida na câmara UV por 250 horas.

Tabela 7: Teste-t comparando amostras PET virgem e 250 horas.

PET	Virgem	250 h
Média	13,88667	11,484
Variância	0,704297	0,64553
Observações	12	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	8	
Stat t = t	5,544326	
P(T<=t) uni-caudal	0,000272	
t crítico uni-caudal	1,859548	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,000545	
t crítico bi-caudal = $t_{critico}$	2,306004	

A tabela 8, refere-se ao teste entre a amostra 250 h e a de 500 h. Nesse caso, contrastando com o anterior temos o valor de $t < 0$, portanto, a $H_1: \mu_1 < \mu_2$. E como no caso anterior $\alpha_d < \alpha$, portanto, rejeitando a hipótese de as amostras serem iguais. Consequentemente, nesse caso com uma confiança de 95%, pode-

se afirmar que a amostra envelhecida em 500 horas possui, em média, o valor da tração na ruptura maior que a amostra de 250 horas, contrariando a premissa da média de resistência ser maior na envelhecida 250 horas em relação a de 500 horas.

Tabela 8: Teste-t comparando amostras PET 250 e 500 horas.

	250 h	500 h
Média	11,484	12,742
Variância	0,64553	0,32382
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	7	
Stat t = t	-2,8571	
P(T<=t) uni-caudal	0,012219	
t crítico uni-caudal	1,894579	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,024439	
t crítico bi-caudal = $t_{crítico}$	2,364624	

O teste para as amostras de PET envelhecidas em 500 horas e 750 horas está apresentado tabela 9. Aqui se tem um caso análogo ao primeiro caso visto, com $t > 0$ e $\alpha_d < \alpha$, portanto a média da amostra de 500 horas, com uma confiança de 95%, é maior do que a envelhecida 750 horas.

Tabela 9: Teste-t comparando amostras PET 500 e 750 horas

	500 h	750 h
Média	12,742	11,156
Variância	0,32382	0,03253
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t = t	5,940867	
P(T<=t) uni-caudal	0,000965	
t crítico uni-caudal	2,015048	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,00193	
t crítico bi-caudal = $t_{crítico}$	2,570582	

O último teste das amostras envelhecidas artificialmente está apresentado na **tabela 10**. Nesse caso ocorre uma situação análoga ao segundo caso, pois se tem o $t < 0$, e o $\alpha_d < \alpha$, logo descarta-se a hipótese H_0 e a segunda, H_1 , é que a média da segunda amostra é maior que a da primeira. Portanto, em um intervalo de confiança de 95%, pode-se dizer que a média da amostra de 1000 horas é maior do que a de 750 horas.

Tabela 10: Teste-t comparando amostra PET 750 e 1000 horas

	750 h	1000 h
Média	11,156	11,958
Variância	0,03253	0,52832
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t = t	-2,39462	
P(T<=t) uni-caudal	0,037396	
t crítico uni-caudal	2,131847	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,074792	
t crítico bi-caudal = $t_{critico}$	2,776445	

Em suma os resultados estão de acordo com o que se mostra o gráfico das médias no PET (figura 12). A amostra não envelhecida tem uma maior resistência no ponto de ruptura, seguido da amostra de 500, 250, 1000 e 750 horas. Esse resultado, ainda que parcialmente, mostra que existe uma diferença da não degradada, com as outras. A tendência esperada era uma queda gradativa da tração no momento da ruptura, que não se observou, disso pode-se pensar em possíveis explicações. Uma seria uma possível variabilidade do material, inerente aos não tecidos agulhados, ou também alguma relação entre o posicionamento do material dentro da câmara UV. Esses são possíveis fatores que dificultaram relacionar o tempo exposto a média das trações de ruptura, mas nesse caso se observou a mudança para menores valores de resistência, quando degradada.

A comparação para correlacionar a degradação acelerada com a feita em campo está apresentada na tabela 11. Inicialmente comparou-se a virgem com a de 6 meses para ver se houve a degradação, se constatada que sim, compara-se com a de 1000 horas.

Tabela 11: Teste-t comparando amostra PET virgem e 6 meses.

	Virgem	6 meses
Média	13,88667	11,958
Variância	0,704297	0,52832
Observações	12	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	9	
Stat t = t	4,757351	
P(T<=t) uni-caudal	0,000517	
t crítico uni-caudal	1,833113	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,001033	
t crítico bi-caudal = $t_{critico}$	2,262157	

Temos nesse caso $\alpha_d < \alpha$ e $t > 0$, logo se rejeita a hipótese H_0 , que a média das amostras, em um intervalo de 95% de confiança, são estatisticamente diferentes, sendo a virgem maior que a envelhecida em campo.

Então realiza-se o teste com a amostra 1000 horas e 6 meses em campo apresentado na tabela 12. Tem-se que $t < t_{critico}$ e $\alpha_d > \alpha$, portanto a hipótese de as médias das amostras serem iguais, em um nível de confiança é de 95%.

Tabela 12: Teste-t comparando amostra PET 1000 horas e 6 meses.

	1000 h	6 meses
Média	11.958	13.482
Variância	0.52832	2.44947
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	6	
Stat t = t	-1.9748	
P(T<=t) uni-caudal	0.047856	
t crítico uni-caudal	1.94318	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0.095711	
t crítico bi-caudal = $t_{critico}$	2.446912	

Consequentemente, com esses valores de tração de ruptura médios se consegue correlacionar com o tempo de exposição o campo a 1000 horas na câmara. Outro efeito observado foi a queda expressiva da deformabilidade (figura 13).

Quanto ao PP, as tabelas 13, 14, 15 e 16, mostram respectivamente os testes t entre as amostras virgem e 250 horas de UV, 250 e 500 horas, 500 e 750 horas e 750 e 1000 horas. Em todos os casos se nota que $t < t_{critico}$, e o $\alpha_d > \alpha$, portanto a hipótese H_0 não é descartada, logo, em um intervalo de 95% de confiança, não se pode dizer que as médias são diferentes.

Tabela 13: Teste-t comparando amostra PP virgem e 250 horas

	Virgem	250 h
Média	19,70333	20,432
Variância	4,667442	1,13482
Observações	12	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	14	
Stat t = t	-0,92847	
P(T<=t) uni-caudal	0,184448	
t crítico uni-caudal	1,76131	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,368896	
t crítico bi-caudal = $t_{crítico}$	2,144787	

Tabela 14: Teste-t comparando amostras PP 250 e 500 horas

	250 h	500 h
Média	20,432	19,634
Variância	1,13482	7,68423
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t = t	0,600865	
P(T<=t) uni-caudal	0,287064	
t crítico uni-caudal	2,015048	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,574127	
t crítico bi-caudal = $t_{crítico}$	2,570582	

Tabela 15: Teste-t comparando amostra PP 500 e 750 horas

	500 h	750 h
Média	19,634	17,9
Variância	7,68423	0,9438
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t = t	1,320013	
P(T<=t) uni-caudal	0,122015	
t crítico uni-caudal	2,015048	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,244031	
t crítico bi-caudal = $t_{crítico}$	2,570582	

Tabela 16: Teste-t comparando amostra PP 750 e 1000 horas

	750 h	1000 h
Média	17,9	19,272
Variância	0,9438	3,91272
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	6	
Stat t = t	-1,39212	
P(T<=t) uni-caudal	0,106648	
t crítico uni-caudal	1,94318	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,213295	
t crítico bi-caudal = $t_{crítico}$	2,446912	

A tabela 17 e 18, comparam a amostra virgem com, respectivamente, de 750 e 1000 horas. Aqui se tem dois casos, no que envolve a amostra 750 horas, $\alpha_d < \alpha$, portanto a hipótese H_0 é descartada, então com uma confiança de 95%, as médias de tração das amostras são diferentes, sendo a resistência a tração da amostra da não degradada maior. Para o caso da amostra de 1000 horas percebe-se que o $t < t_{crítico}$, e o $\alpha_d > \alpha$, assim como as anteriores, indicando que as amostras, nesse caso, estatisticamente são iguais em um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 17: Teste-t comparando amostra PP virgem e 750 horas

	Virgem	750 h
Média	19,70333	17,9
Variância	4,667442	0,9438
Observações	12	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	15	
Stat t = t	2,372574	
P(T<=t) uni-caudal	0,015732	
t crítico uni-caudal	1,75305	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,031465	
t crítico bi-caudal = $t_{crítico}$	2,13145	

Tabela 18: Teste-t comparando amostra PP virgem e 1000 horas

	Virgem	1000 h
Média	19,70333	19,272
Variância	4,667442	3,91272
Observações	12	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	8	
Stat t = t	0,398513	
P(T<=t) uni-caudal	0,350338	
t crítico uni-caudal	1,859548	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,700677	
t crítico bi-caudal = $t_{critico}$	2,306004	

Assim como no PET, a análise estatística do PP mostra a tendência parecida com o gráfico (figura 14). Os intervalos entre as médias das amostras não são significativos, entretanto, a amostra virgem possui uma diferença para a degradada por 750 horas na câmara UV. Quanto às outras médias, entre si não se pode confirmar que elas são diferentes, o motivo disso é a grande variabilidade dos valores das diferentes amostras, os corpos de prova envelhecidos 750 horas a variância é relativamente menor, assim como a média da resistência. Esse resultado se opõe ao esperado, pois como já dito anteriormente, esperava-se que o geotêxtil de polipropileno fosse mais agredido pelo UV, no quesito de perda de resistência. Entretanto é nítida a perda da capacidade de deformação, uma propriedade importante em muitas aplicações, mas nesse caso não se encontrou correlação da força máxima.

Por fim a tabela 19 apresenta o teste t entre a amostra virgem e a 6 meses exposta: Nesse caso $\alpha_d < \alpha$, portanto a hipótese H_0 é descartada, então com uma confiança de 95%, as médias das amostras são diferentes, sendo a amostra virgem maior pois $t > 0$.

Tabela 19: Teste-t comparando amostra PP virgem e 6 meses.

	Virgem	6 meses
Média	19,70333	16,104
Variância	4,667442	0,52433
Observações	12	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	15	
Stat t = t	5,121981	
P(T<=t) uni-caudal	6,26E-05	
t crítico uni-caudal	1,75305	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,000125	
t crítico bi-caudal = $t_{critico}$	2,13145	

A tabela 20 mostra a comparação entre a amostra 1000 horas de UV e 6 meses de campo, onde os valores são parecidos com a tabela anterior, portanto a amostra degradada em campo tem uma resistência média menor que a de 1000 horas.

Tabela 20: Teste-t comparando amostra PP 1000 e 6 meses

	1000 h	6 meses
Média	19,272	16,104
Variância	3,91272	0,52433
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t = t	3,36297	
P(T<=t) uni-caudal	0,010021	
t crítico uni-caudal	2,015048	
P(T<=t) bi-caudal = α_d	0,020043	
t crítico bi-caudal = $t_{critico}$	2,570582	

Então nesse caso, olhando tal parâmetro, pode se dizer que o envelhecimento ao ar livre durante 6 meses no caso do PP equivale a mais de 1000 horas de câmara UV.

5.4 DSC

A análise do DSC foi feita para as amostras virgens, envelhecidas por 1000 horas e 6 meses a campo. Os resultados dos quatro primeiros ciclos do equipamento estão apresentados figuras 14, 15 e 16 para o PET virgem, o envelhecido durante 1000 horas na câmara UV e o envelhecido 6 meses no painel de exposição, respectivamente

Figura 13: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PET virgem

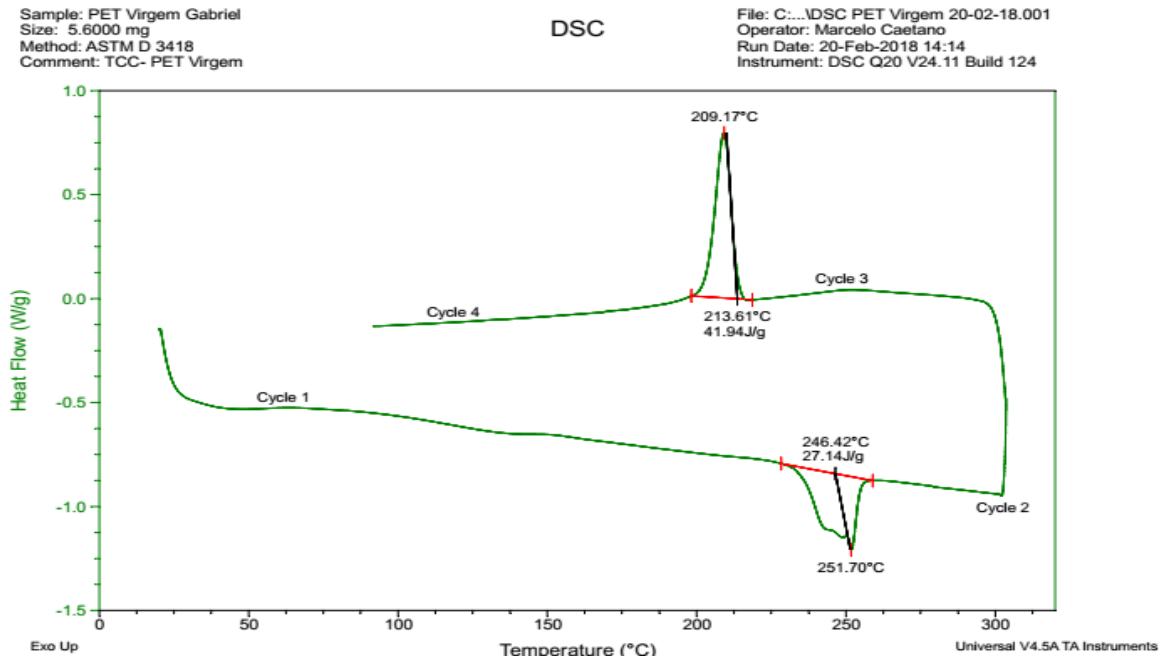


Figura 14: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PET 1000 h.

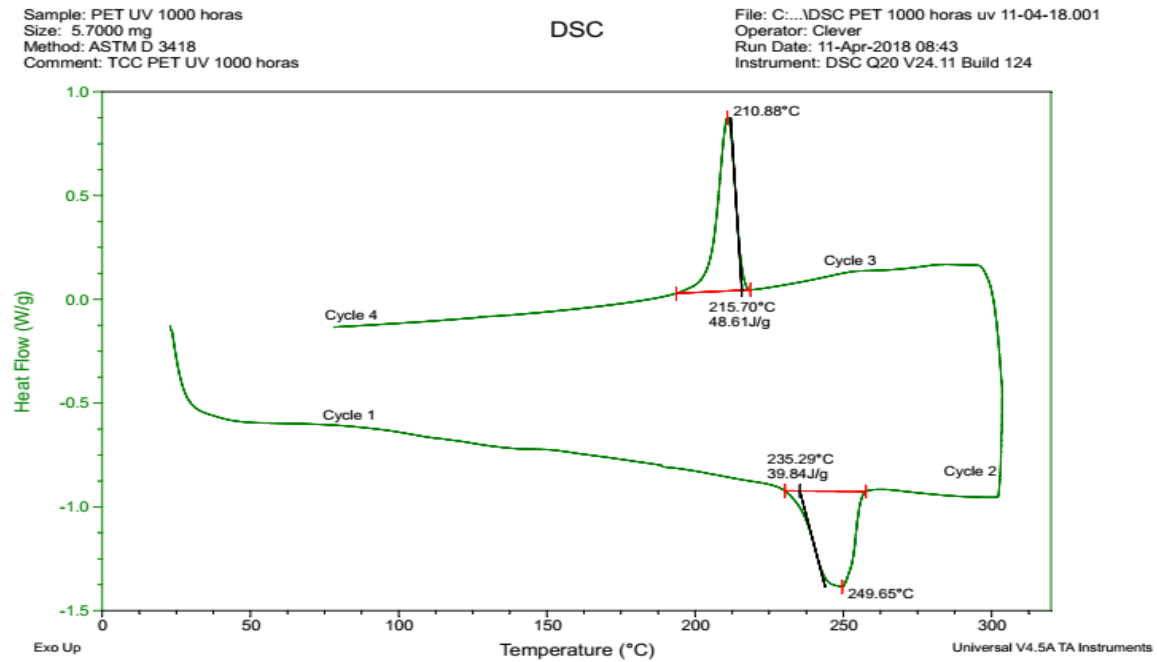
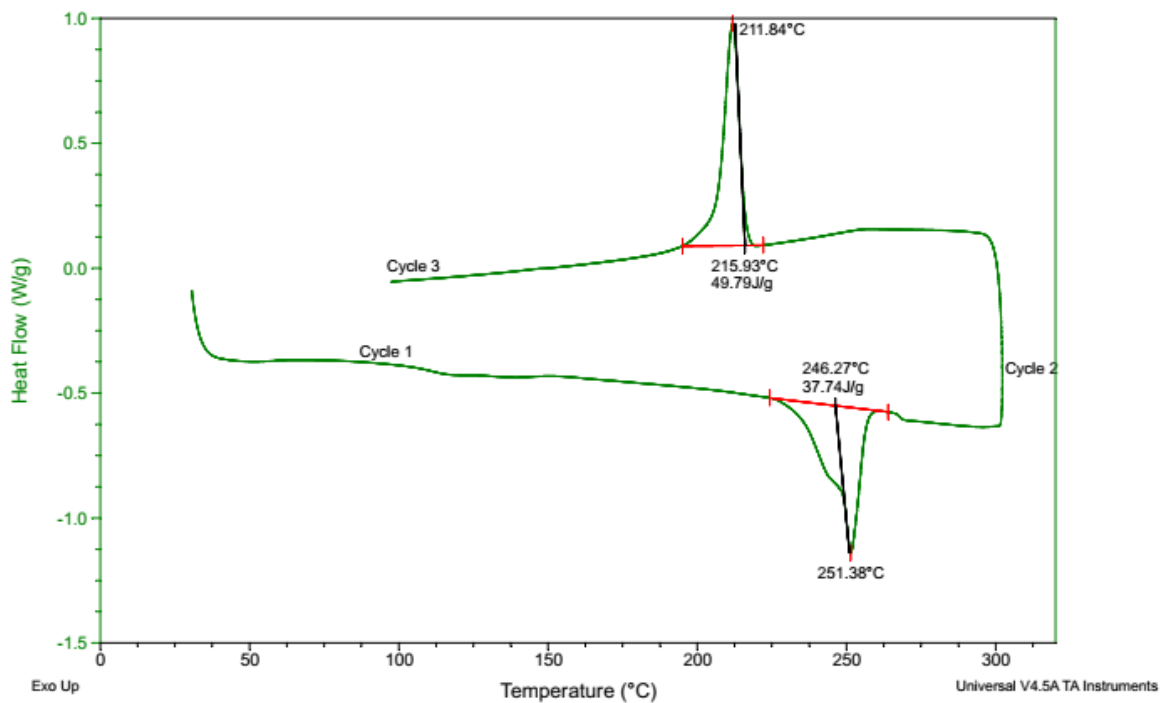


Figura 15: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PET envelhecido 6 meses.



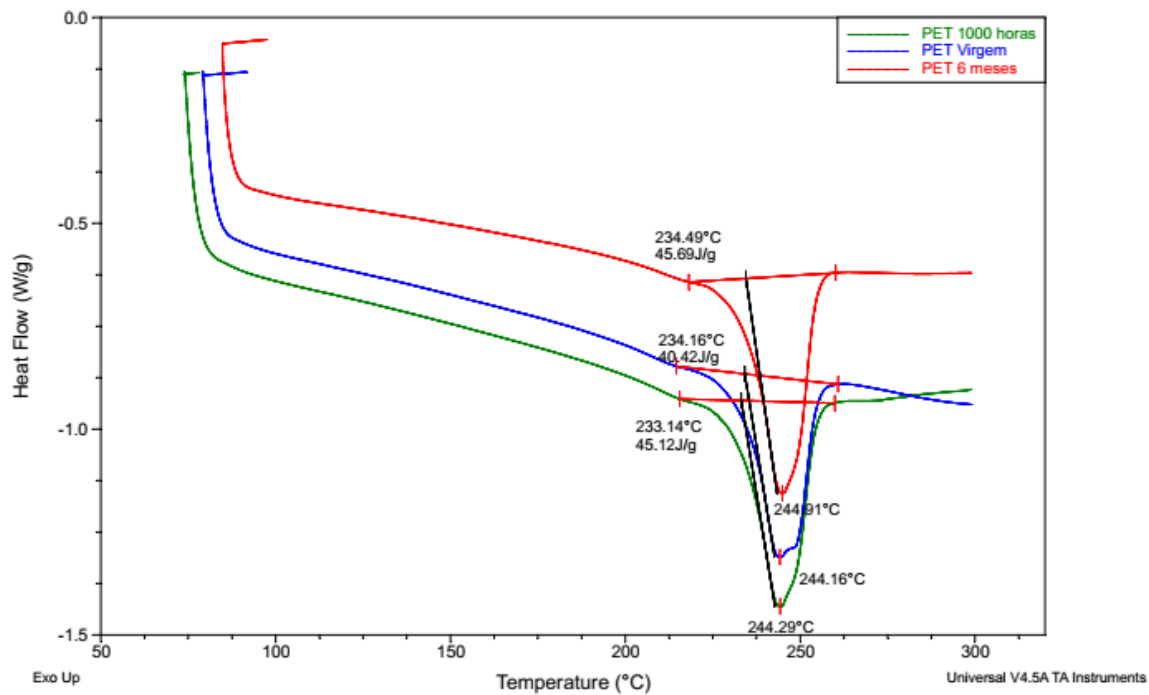
As figuras mostram tendências parecidas entre as curvas. O primeiro ciclo, trata-se do primeiro aquecimento do PET, que em torno de 240 ° C começa a fusão do material, tendo um pico próximo de troca de calor, na temperatura 250 ° C, nos três casos. Esse pico endotérmico, reflete a total mudança de estado do polímero. Os gráficos também mostram a temperatura de calor latente de fusão, sendo em torno de 27 J/g na virgem ,38 J/g no caso da amostra envelhecida de forma acelerada e em campo. Essa foi a energia necessária para fundir as amostras, sendo a temperatura de fusão levemente maior na amostra virgem e a energia de calor latente maior na amostra envelhecida. Nota-se também que nas figuras 14 e 16, existe uma primeira queda, para depois chegar no ponto mínimo do intervalo, isso provavelmente se deve à disposição das fibras do geotêxtil que dificulta um aquecimento homogêneo do material no primeiro ciclo.

No segundo ciclo, os polímeros passam a perder energia térmica, preparando o equipamento para um processo exotérmico (em que ocorre a liberação de energia), que ocorre no ciclo 3. Esse processo é a cristalização do material, voltando a um estado sólido, mas em uma organização diferente das fibras cortadas, como antes da fusão. Nos três corpos de provas, a cristalização começa próximo de 215 ° C e o pico de troca de calor ocorre em torno de 210 ° C. O calor latente é de 41 J/g para a PET virgem e de cerca de 48 J/g para as duas outras.

O quarto ciclo trata-se de uma fase de estabilização, tendo um fluxo de energia baixo, enquanto

no quinto ciclo ocorre um reaquecimento e uma repetição da fusão do material. A figura 17 mostra o último ciclo nas amostras de PET, tal gráfico foi colocado separadamente para não existir sobreposição com o primeiro ciclo. As temperaturas de fusão e máxima, assim como o calor latente estão em patamares bem próximos, respectivamente, 234 ° C, 244 ° C e 45 J/g, exigindo um pouco mais de energia para a amostra de 1000 horas e 6 meses, para a mudança de estado. Comparado com o primeiro ciclo esse último tem pontos de fusão menores, conforme a literatura (CANEVAROLO JR., 2009) .

Figura 16: Temperatura por fluxo de calor, referente ao quinto ciclo das amostras do PET.



Os resultados do DSC feitos com o PP estão apresentados nas figuras 18, 19 e 20 para, respectivamente as amostras virgens, 1000 horas de envelhecimento e 6 meses em campo.

Figura 17: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PP virgem

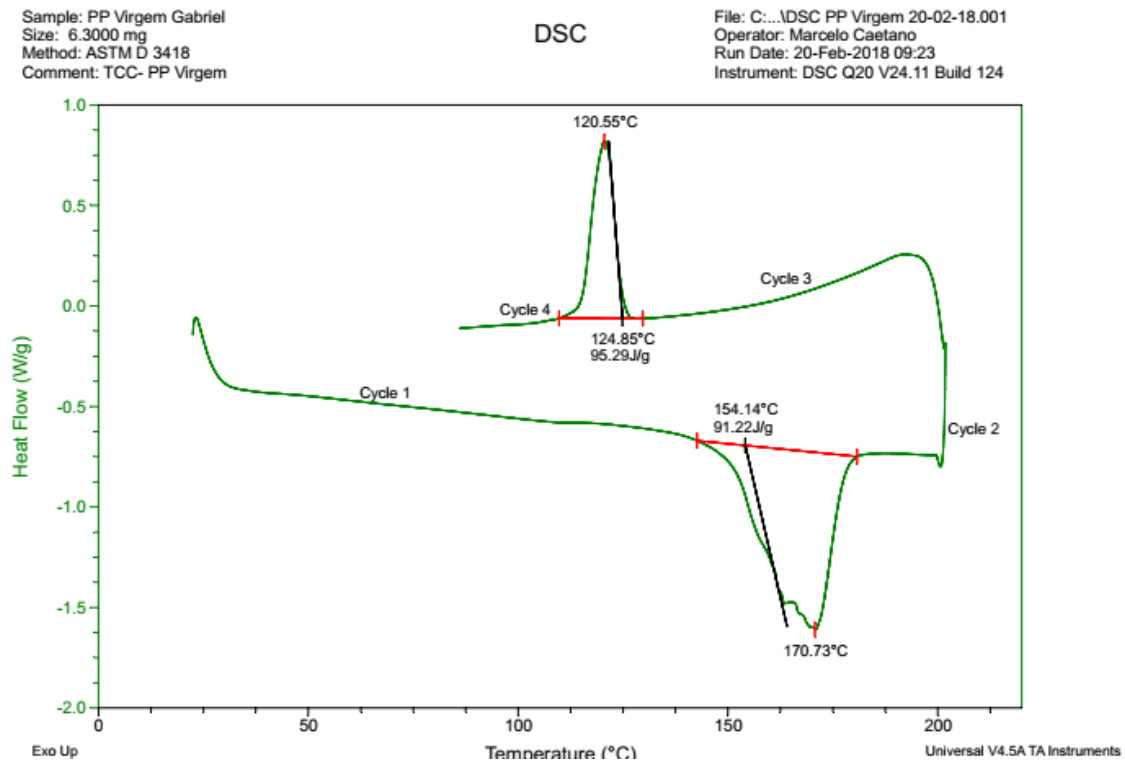


Figura 18: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PP 1000 horas de envelhecimento.

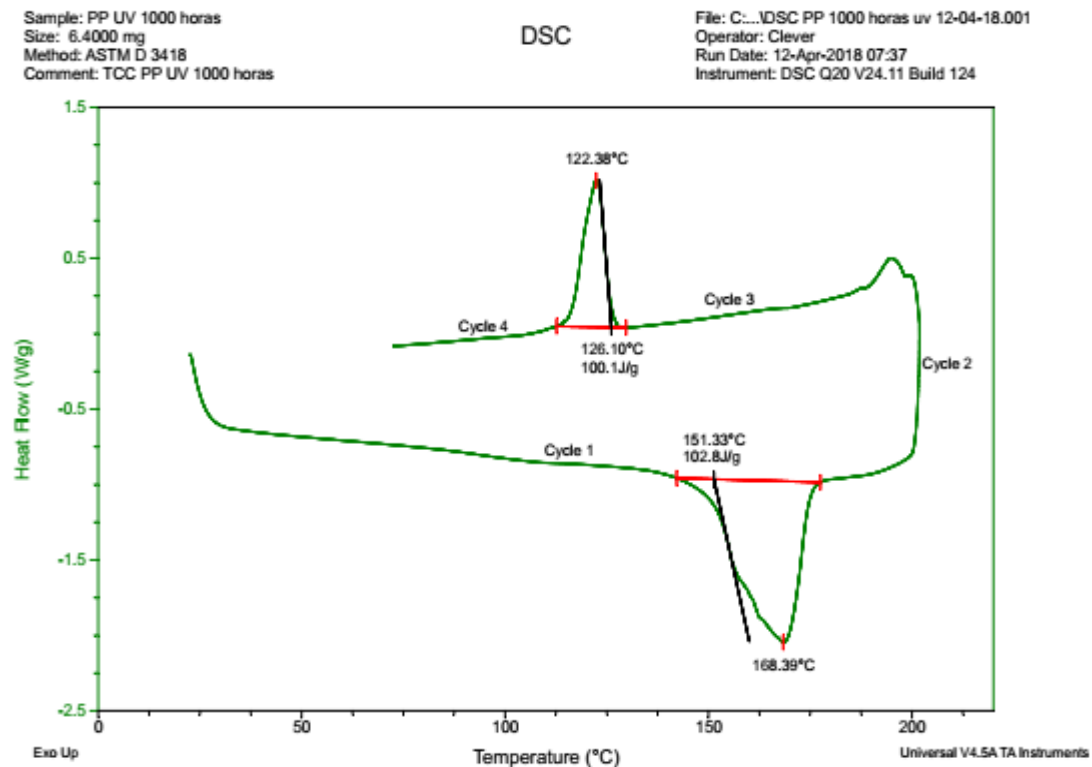
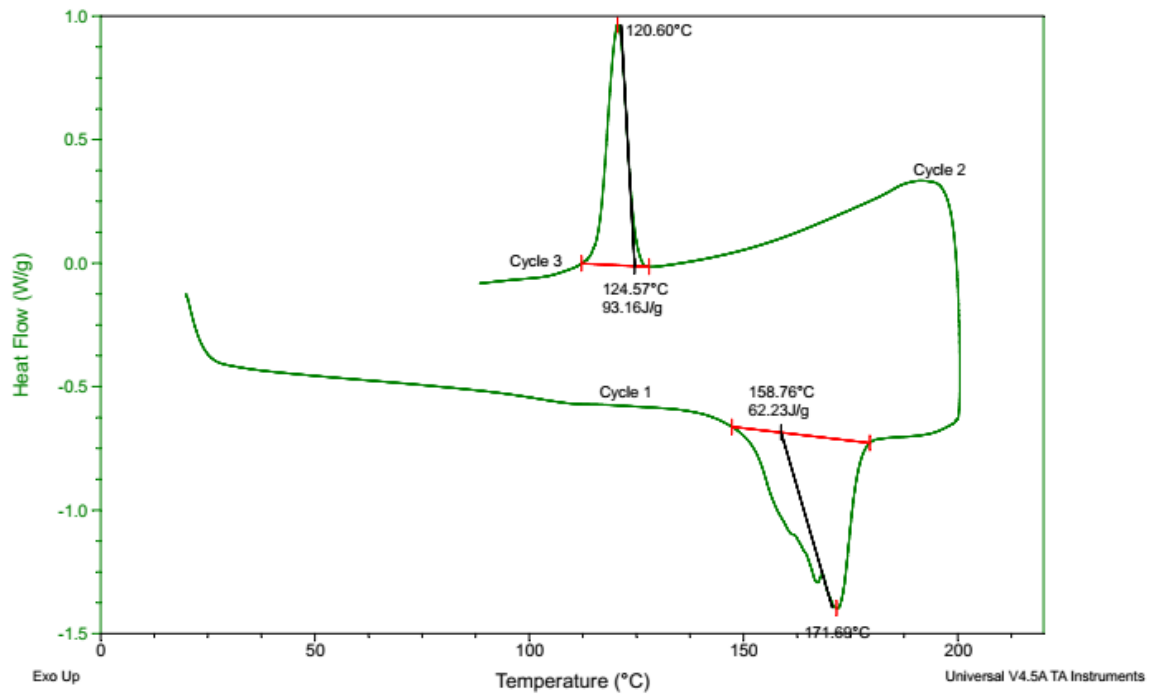


Figura 19: Temperatura por fluxo de calor, referente ao DSC do PP 6 meses de envelhecimento.

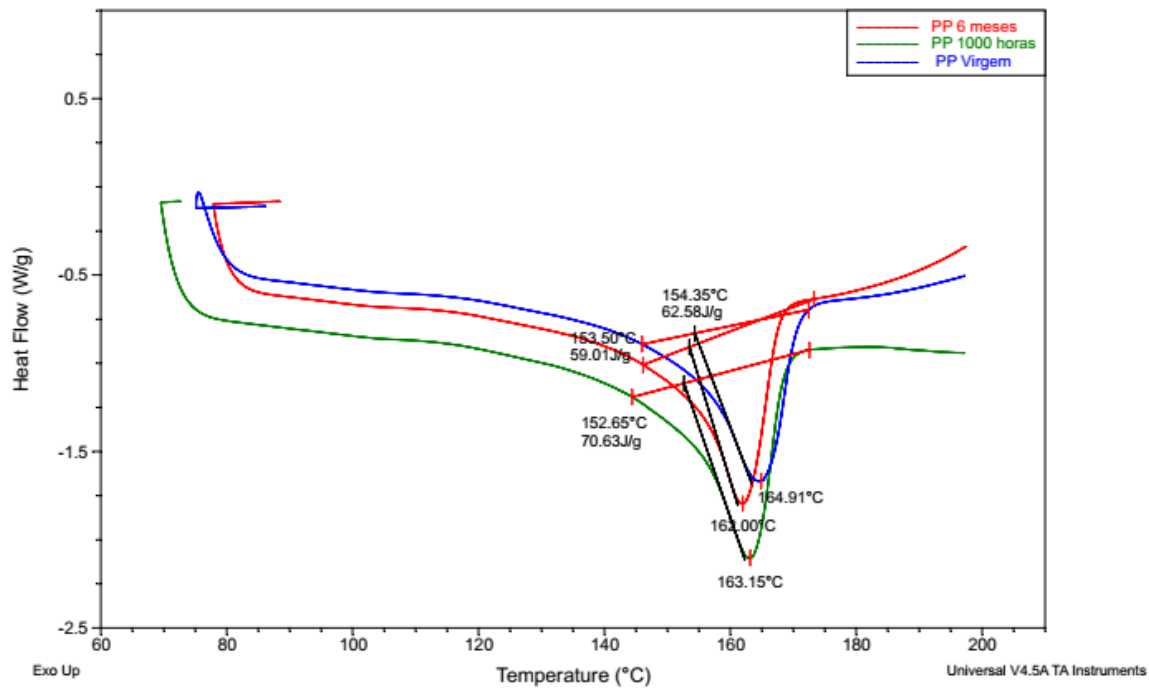


Nesse material, em ambas amostras, nota-se comportamentos parecidos com os mesmos ciclos. No primeiro, tem-se a temperatura de fusão e calor latente de fusão, em torno de 150 °C e 100 J/g, sendo a temperatura de fusão levemente maior para a amostra virgem e o mesmo para o calor latente para a amostra envelhecida de 1000 horas, essa mesma tendência também pôde ser observada na amostra PET. Para a amostra envelhecida de 6 meses, o calor latente é de 62 J/g. Isso se deve pela não uniformidade da fusão. O pico das amostras foi em torno de 170 °C.

O início do terceiro ciclo do teste possui um início interessante, com um pico seguido de uma queda suave até a cristalização do polipropileno. Quanto ao ponto de solidificação fica em torno de 125 °C e uma energia de calor latente de mudança de estado próximo a 100 J/g. No pico de troca de calor, há perda nesse caso pois se trata um processo exotérmico, a temperatura está na faixa de 120 °C.

Quanto à segunda fusão, as curvas sobrepostas na figura 21, evidenciam a similaridade, típica dessa última fase, onde o material se derrete de forma similar entre as amostras, ao contrário da primeira fusão. Os pontos de fusão estão na faixa de 152 °C e o calor latente em torno de 60 J/g para a virgem e a de 6 meses, 70 J/g para a de 1000 horas. A partir da temperatura próxima de 163 °C em ambos casos, ocorre o pico de troca de calor.

Figura 20: Gráfico da temperatura por fluxo de calor, referente ao quinto ciclo das amostras do PP.



Em suma as análises feitas pelo DSC permitem concluir que a nível molecular os polímeros permanecem intactos. As variações de alguns valores em relação a suas contrapartes de outras curvas são variações que ocorrem normal em análises termoquímicas e não podem ser atribuídas as condições de envelhecimento. Assim em geotêxteis de PET e PP de espessura média, a diminuição da resistência a tração está pouco ou nada relacionada a alterações químicas no material, e sim fatores de natureza física do produto.

5.5 Análise qualitativa

As figuras 22 a 26, mostram as imagens das fibras superficiais dos materiais, do lado que ficou em contato direto com a radiação ultravioleta.

Figura 21: Geotêxtil de PET virgem, ampliação de 5 vezes.

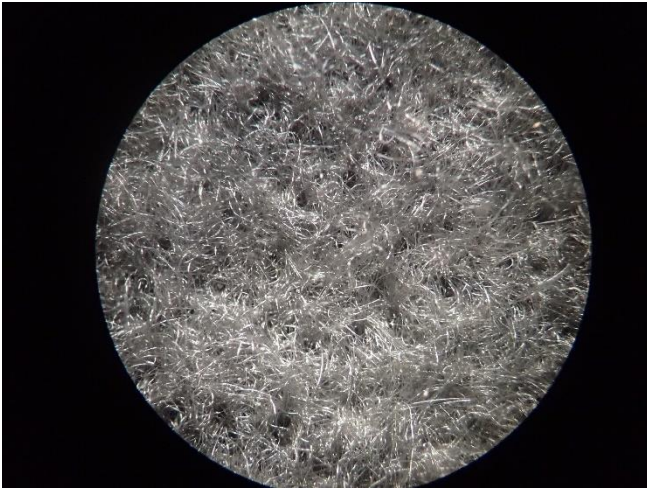


Figura 23: Geotêxtil de PET envelhecido 1000 horas, ampliação de 5 vezes.

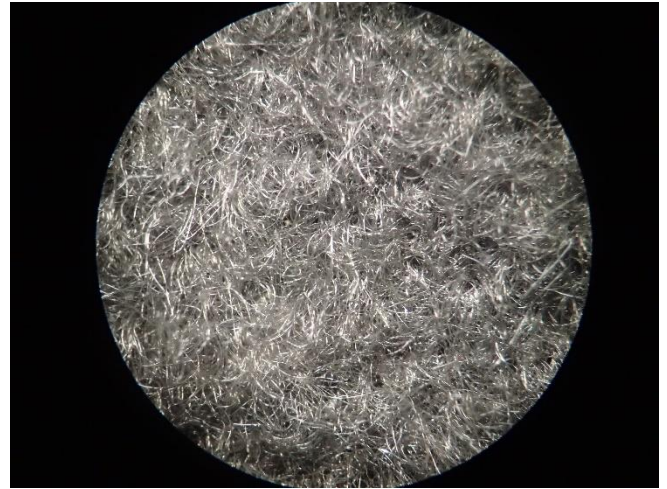


Figura 22: Geotêxtil de pp virgem, ampliação de 5 vezes.

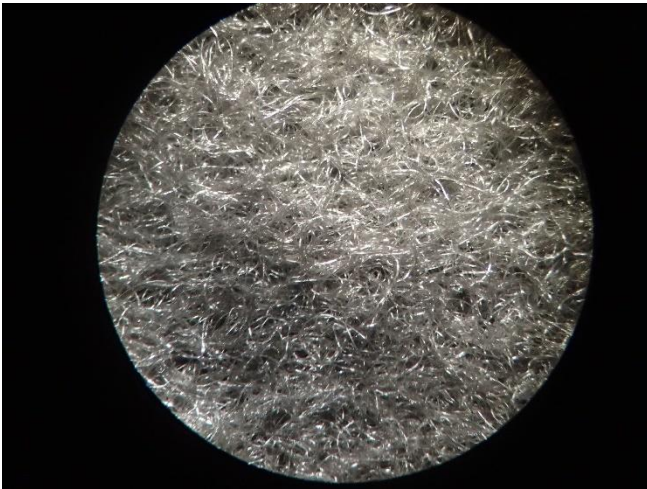


Figura 24: Geotêxtil de PP envelhecido por 1000 horas, ampliação de 5 vezes.



Aparentemente nessas figuras não se percebe mudança drástica na disposição das fibras, ou mesmo a quebra das fibras. Nesse ponto pode-se dizer que o aumento de 5 vezes, com um microscópio simples não mostrou mudanças aparentes, possivelmente pela fibra curta ou a ampliação realizada. Um aumento maior talvez proporcione uma forma de verificar individualmente as fibras como, por exemplo, Mathur, Netravali e O'Rourke (1994), que usando microscopia eletrônica de varredura conseguiram achar microfaturas nas fibras de geotêxteis degradados em ambientes de alta alcalinidade.

Outra observação qualitativa é a sensação tátil dos geotêxteis após o envelhecimento. O lado diretamente afetado pela radiação, torna-se mais áspero, passando a impressão de estar mais frágil, quebradiço, e com uma cor diferente. Depois de um tempo longe da umidade, temperatura e radiação a sensação torna-se imperceptível. Quando o teste de tração, DSC e massa por unidade foram feitos tais mudanças estavam parcialmente perceptíveis (24 horas pós envelhecimento). Essas características ficaram mais evidentes na manta de polipropileno do que na de polietileno, e possivelmente essa variação relaciona-se com a perda da capacidade de alongamento do material. Koerner, Lord, Hsuan (1992) acreditam que a deformação do material reflete diretamente a fragilidade e capacidade do polímero para se fragmentar.

6 Conclusão

O estudo realizado buscou avaliar os efeitos do ensaio de envelhecimento acelerado em câmara UV e o de exposição a intempéries. Os ensaios possibilitaram verificar as propriedades físicas, mecânicas, químicas e estruturais, mas não foi possível a correlação do ensaio acelerado com o exposto.

Houve uma nítida modificação dos geotêxteis constatado por meio da análise qualitativa. As causas não se restringem apenas à radiação UV, ainda que este seja o principal responsável, mas também à umidade e variação de temperatura, típica desse tipo de ensaio.

As propriedades avaliadas foram massa por área, resistência a tração e deformação e calorimetria exploratória diferencial. A massa por área mostrou uma leve perda para a manta de polipropileno, enquanto para o polietileno tereftalato uma perda irrisória com o tempo de ensaio. A resistência a tração variou, em uma ordem de grandeza, a cada 250 horas no ensaio acelerado por UV, de 4% para o PET, e de 2,5% do PP. A deformação na ruptura, em média foi mais alterada

no material de PP em 3,75% e de 0,25% no PET. A correlação com os resultados do ensaio feito a campo deixaram o PET próximo a e o PP, relativos a tração máxima, quanto à deformabilidade esse envelhecimento foi maior do os da câmara. O resultado do DSC, em ambos materiais e envelhecimentos foram praticamente iguais, indicando que as propriedades das cadeias poliméricas não se alteraram. A análise qualitativa foi pouco expressiva devido a limitação do equipamento disponível.

Os resultados encontrados são relevantes pois sugerem que em suas aplicações os geotêxteis não tecidos de fibra curta produzidos no Brasil são susceptíveis a degradação causada por intemperismo, assim como de indústrias estrangeiras reportados pela literatura, simulados no ensaio acelerado. Na prática essa degradação ocorre na fase da obra em que se emprega o geotêxtil, antes de ser recoberto, ou também em casos excepcionais que o material acaba em contato com a luz solar. A indústria deve focar em achar formas eficientes para a proteção desse tipo de material, mas que ao mesmo tempo tenha baixo potencial de contaminar o solo, quanto o setor de construção civil deve se atentar na aplicação de materiais geossintéticos com a mínima exposição possível para o melhor dimensionamento das propriedades mecânicas.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Para a continuidade de pesquisas nessa linha pode-se recomendar algumas práticas. Em ensaios acelerados em câmara UV uma possível melhoria a ser feita é utilizar todo espaço das grades para posicionar os geotêxteis, isso resultaria em um numero maior de corpos de prova e possivelmente dados mais convergentes e possíveis correlações com o método de exposição a intempéries.

Para tanto o ensaio acelerado, quanto o natural seria interessante o registro das temperaturas, umidade e irradiação UV, esses dados podem ajudar a compreender até que ponto tais fatores são influentes na degradação desses polímeros.

Outra pratica seria a avaliação de outras propriedades mecânicas e outros materiais como geomembranas, geogrelhas e também geotêxteis tecidos.

Quanto a analise fotográfica, uma microscopia eletrônica de varredura, talvez possa mostrar efeitos da fotodegradação na superfície das fibras dos materiais, também pode-se comparar a degradação da face exposta com a não exposta.

7 Referências bibliográficas

AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C. Introdução. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2004. cap 1, p. 1-13.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2015). **Standard Practice for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics - Strip Method: ASTM 5035**. ASTM International, Pennsylvania

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2009). **Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure. ASTM D 5970**. ASTM International, Pennsylvania.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2017). **Standard Test Method for Effect of Exposure of Unreinforced Polyolefin Geomembrane Using Fluorescent UV Condensation Apparatus: ASTM D7238-06**. ASTM International, Pennsylvania

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2009). **Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method. ASTM D 4595**. ASTM International, Pennsylvania.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2015). **Standard Test Method for Trapezoid Tearing Strength of Geotextiles: ASTM D4533 / D4533M-15**. ASTM International, Pennsylvania

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). **Geossintéticos – Amostragem e preparação de corpos-de-prova de geotêxteis – Procedimento: NBR ISO 9862**. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2005). **Geossintéticos - Determinação do comportamento em deformação e na ruptura, por fluência sob tração não confinada: NBR ISO 15226**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). **Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga. NBR ISO 10319**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). **Geossintéticos – Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos. NBR ISO 9864**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2018). **Geossintéticos – Termos e Definições. NBR ISO 10318-1**. Rio de Janeiro.

BERNAL, C.; BOLDARINI, A.C.; TRAZZI, S.; CAVALHERO, S.G.; TADEU, E. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. **Química Nova**, v. 25, n. 5, p. 849–855, 2002.

BUENO, B. S. Matérias Primas. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2004. cap 2, p. 13-27.

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Propriedades, ensaios e normas. In: VERTEMATTI, J. C. **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2004. cap 3, p. 27-63.

CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros—Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros**. 2º ed. São Paulo, Artliber, 2006, p. 280.

CARNEIRO, J. R.; MORAIS, M.; LOPES, M. DE L. Degradation of polypropylene geotextiles with different chemical stabilisations in marine environments. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 877–886, 2018.

CARNEIRO, J. R.; ALMEIDA, P. J.; LOPES, M. D. L. Some synergisms in the laboratory degradation of a polypropylene geotextile. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 586–591, 2014.

CASSIDY, P. E.; MORES, M.; KERWICK, D. J.; KOECK, D.J. Chemical resistance of geosynthetic materials. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 11, n. 1, p. 61–98, 1992.

DESCRITIVO Técnico - **Série EQUV: Câmara de Ensaio de Intemperismo Acelerado UVA - UVB**. 2017. Disponível em: <http://equilam.com.br/admin/acoes/descritivo_tecnico_equv.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2018.

DIAS, M.; CARNEIRO, J. R.; LOPES, M. DE L. Resistance of a nonwoven geotextile against mechanical damage and abrasion. **Ciencia e Tecnologia dos Materiais**, v. 29, n. 1, p. e177–e181, 2017.

HORNSEY, W.; SERVICE, B. A major failure involving an exposed geotextile to contain dredged spoil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, n. 5, p. 548–555, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2013). **Textiles - Tensile**

properties of fabrics -- Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method. ISO 13934-1. Switzerland.

IONASHIRO, M. **Giolito: Fundamentos de Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial.** 1. ed. São Paulo: Giz Editorial, 2004.

KOERNER, R. M.; HSUAN, Y. G.; KOERNER, R. M. Photo-initiated degradation of geotextiles. **Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 124, n. December, p. 196–201, 1986.

KOERNER, R. M.; LORD, A. E.; HALSE, Y. H. Long-term durability and aging of geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, n. 1–2, p. 147–158, 1988.

KOERNER, R. M.; LORD, A. E.; HSUAN, Y. H. Arrhenius modeling to predict geosynthetic degradation. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 11, n. 2, p. 151–183, 1992.

LODI, P. C. **Aspecto de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli (cloreto de vinila) (PVC).** 2003. p. 354. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

LODI, P. C., BUENO, B.S., VILAR, O.M., CORREIA, N.S. Weathering Degradation Of Polyester And Polypropylene Geotextiles. **Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics**, p. 35–39, 2008.

MARQUES, A. R., PATRÍCIO, P. S. O., SOARES, F.S., MONTEIRO, M.L., URASHIMA, D.C., RODRIGUES, C.S. Effects of the climatic conditions of the southeastern Brazil on degradation the fibers of coir-geotextile: Evaluation of mechanical and structural properties. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 42, n. 1, p. 76–82, 2014.

MATHUR, A.; NETRAVALI, A. N.; O'ROURKE, T. D. Chemical aging effects on the physio-mechanical properties of polyester and polypropylene geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 13, n. 9, p. 591–626, 1994.

METHACANON, P. et al. Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, n. 4, p. 1090–1096, 2010.

MILAGRES, B. V. **Degradação de geotêxteis frente a elementos climáticos em ensaios de campo e laboratório: realidade climática local.** 2016. 136p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Núcleo Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

MISZKOWSKA, A.; LENART, S.; KODA, E. Changes of permeability of nonwoven geotextiles due to clogging and cyclic water flow in laboratory conditions. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 9, 2017.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4^a ed. Tradução de V. Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2009.490p.

ORTEGO, J. D. AMINABHAVI, T. M., HARLAPUR, S. F., BALUNDGI, R. H. A review of polymeric geosynthetics used in hazardous waste facilities. **Journal of Hazardous Materials**, v. 42, n. 2, p. 115–156, 1995.

ROLLIN, A. L.; LOMBARD, G. Mechanisms affecting long-term filtration behavior of geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, n. 1–2, p. 119–145, 1988.

SHUKLA, S. K. **Geosynthetics and their applications**. London, [England]: Thomas Telford, 2002.

SINGH, R. M.; BOUAZZA, A. Thermal conductivity of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 39, p. 1–8, 2013.

SUITS, L. D.; HSUAN, Y. G. Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 21, n. 2, p. 111–122, 2003.

TOUZE-FOLTZ, N. et al. A review of the performance of geosynthetics for environmental protection. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, n. 5, p. 656–672, 2016.

WIEWEL, B. V.; LAMOREE, M. Geotextile composition, application and ecotoxicology—A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 317, p. 640–655, 2016.

