

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAG GEISELLE ALVES GUIMARÃES

**ESTIMATIVA DA DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS SOB SINERGIA: FLUÊNCIA
À TRAÇÃO E INTEMPÉRIES**

BELO HORIZONTE

2023

MAG GEISIELLY ALVES GUIMARÃES

**ESTIMATIVA DA DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS SOB SINERGIA: FLUÊNCIA
À TRAÇÃO E INTEMPÉRIES**

**Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil do Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção
do título de Doutora em Engenharia Civil.**

Orientadora: Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima

BELO HORIZONTE

2023

G963e Guimarães, Mag Geisielly Alves
Estimativa da durabilidade de geotêxteis sob sinergia: fluência à tração e
intempéries / Mag Geisielly Alves Guimarães. – 2023.
236 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Denise de Carvalho Urashima.
Bibliografia: f. 197-205.
Tese (doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Geotêxteis – Teses. 2. Vida útil (Engenharia) – Teses. 3. Materiais –
Teses. 4. Confiabilidade (Engenharia) – Análise – Teses. 5. Desenvolvimento
sustentável – Teses. I. Urashima, Denise de Carvalho. II. Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 624.153

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAG GEISIELLY ALVES GUIMARÃES

**ESTIMATIVA DA DURABILIDADE DE GEOTÊXTEIS SOB SINERGIA: FLUÊNCIA
À TRAÇÃO E INTEMPÉRIES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Aprovado em 02/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima, CEFET/MG - Orientadora

Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues, CEFET/MG - Membro interno

Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira, NUGEO/UFOP - Membro externo

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido, UFLA - Membro externo

DEDICATÓRIA

A Professora Denise, pela amizade, conselhos e apoio.

Aos meus Pais Sérgio e Maria, Irmã Mara e Esposo Wesley, pelo amor, cuidado e apoio.

A Yasmin, por iluminar minha vida com sua doçura.

AGRADECIMENTOS

A obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil é a concretização de um planejamento que se iniciou ainda como discente de graduação. Imergir em pesquisa científica-acadêmica me fez “sonhar” em ser uma docente-pesquisadora. Por acreditar na capacitação contínua e na multiplicação de conhecimentos, traçar metas e repensar sobre o nosso papel ético e profissional junto a sociedade é que finalizo esta importante etapa pessoal e profissional.

A caminhada não foi fácil e deixo registrado a minha sincera e profunda gratidão a todos(as) aqueles(as) que me acompanharam neste processo e me auxiliaram das mais diversas maneiras. Na certeza de que a finalização desta etapa só foi possível graças aos apoios recebidos e que ocupam um lugar especial no meu coração.

A minha orientadora, Professora Doutora Denise Urashima, pela primeira oportunidade de pesquisa em 2007 e por acreditar em meu potencial. Pelos acolhimentos afetivos em sua casa e família, simplicidade na transferência dos saberes, conselhos e ensinamentos. A toda a manifestação de incondicional apoio e disponibilidade, por ser exemplo de dedicação à formação profissional-acadêmica e que, sem dúvidas, me ajudou a definir minha profissão.

A Professora Doutora Delma Vidal pela recepção no ITA e em São José dos Campos.

Aos Professores Doutores, Conrado Rodrigues e Eduardo Cândido, pelas contribuições recebidas no Exame de Qualificação.

Ao Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade de Ouro Preto (NUGEO/UFOP), em particular ao Professor Doutor Lucas Ferreira, pelo acesso ao Laboratório de Geossintéticos.

A Huesker Ltda, pelo apoio e doação de geotêxtil para a realização da pesquisa.

Aos fomentos anteriores ao ingresso no Doutorado em Engenharia Civil no CEFET-MG, que foram essenciais para a realização do projeto de pesquisa: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPQ (Demanda Universal 456236/2014-7); Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET/MG (PROPESQ Edital 088/12); Huesker Ltda (Doação de ar-condicionado para ensaios sob condição controlada em laboratório).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo acesso às revistas indexadas via Periódico Capes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET/MG (PPGEC) pelo apoio institucional.

A minha família, minha essência de vida e por compreender minhas ausências devido aos estudos e trabalho. Meus pais, Sérgio Guimarães e Maria das Graças, por todo o amor, apoio, orações, cuidado e dedicações feitas para que pudesse estudar e consolidar minha carreira profissional. A minha irmã, Mara Grazielly, e cunhado, Rogério Cássio, por todas as orações e apoio recebidos. Ao meu esposo, Wesley Caetano, pelo amor, compreensão e caminhada conjunta.

A Beatriz Urashima, Jussara Teles, Kerry Aline, meus discentes do CEFET/MG, pelas manifestações de carinho e constante torcida.

A Deus, pelo dom da vida e saúde, por guiar meus passos e colocar pessoas maravilhosas na minha caminhada pessoal e profissional.

Meu sincero muito obrigada!!

EPIÍGRAFE

“12. Não pretendo dizer que já alcancei (esta meta) e que cheguei à perfeição. Não. Mas eu me empenho em conquistá-la, uma vez que também eu fui conquistado por Jesus Cristo. 13. Consciente de não tê-la ainda conquistado, só procuro isto: prescindindo do passado e atirando-me ao que resta para a frente, 14. persigo o alvo, rumo ao prêmio celeste, ao qual Deus nos chama, em Jesus Cristo. 15. Nós, mais aperfeiçoados que somos, ponhamos nisto o nosso afeto; e se tendes outro sentir, sobre isto Deus vos há de esclarecer. 16. Contudo, seja qual for o grau a que chegamos, o que importa é prosseguir decididamente”.

Filipenses 3, 12-16

RESUMO

Projetos com geossintéticos têm ganhado mercado como alternativa tecnológica e de desenvolvimento sustentável na transformação do espaço geográfico e melhoria da qualidade de vida na atual era do Antropoceno. A aplicabilidade destes materiais poliméricos em projetos de engenharia civil requer o conhecimento da sua durabilidade frente aos fatores de degradação. Sua holística é complexa e depende das condições ambientais, solicitações de instalação e uso que, em grande parte, atuam sinergicamente e de forma não padronizada. Por exemplo, fluência à tração e intemperismo em aplicações costeiras e hidráulicas em sistemas de confinamento de resíduos, ou tubos geotêxteis. A presente pesquisa visou estimar a durabilidade de geotêxteis sob sinergismo de fluência à tração e intemperismo de campo. O delineamento experimental contemplou ensaios de degradação entre inverno/2020 a outono/2021 isolado e em conjunto à fluência por tração, com carregamento de 15% da carga de ruptura, em sete períodos de exposição entre as estações climáticas. Foi avaliado um geotêxtil tecido de polipropileno como exemplificação de estudo e para fins de pesquisa. Resultados evidenciaram o sinergismo de degradação com perdas de resistência à tração superiores a 50% (meia-vida) em 273 dias, bem como a influência da dinâmica climática no comportamento de durabilidade para as condições de contorno avaliadas. A época do ano escolhida para a instalação de geotêxteis em aplicações acima do solo influencia na sua durabilidade ao longo do tempo. Modelos matemáticos log-linear se ajustaram aos resultados amostrais obtidos. Análise de confiabilidade por probabilidades de falha $[F(UV)]$ e de sobrevivência $[S(UV)]$ pela distribuição Weibull realizadas em função de radiação UV estimada agregam em tomadas de decisões de incertezas inerentes às condicionantes do projeto. Este estudo pode ser aplicado a demais geotêxteis e geotêxteis-produtos correlatos e se mostrou eficaz na estimativa da durabilidade por sinergismo de degradação. Os resultados desta pesquisa visaram contribuir em um melhor entendimento da durabilidade para subsidiar em tomadas de decisões que envolvam mitigação de impactos ambientais, técnicos e sociais pela engenharia com geossintéticos.

Palavras-chave: durabilidade; sinergismo; geotêxteis; análise de confiabilidade; desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Designing with geosynthetics has gained market as a technological alternative and sustainable development in the geographic space transformation and improvement of the life quality in the current Anthropocene era. Its holistic approach is complex and depends on environmental conditions, installation, and user requests, which, to a large extent, act synergistically and in a non-standard way. For example, tensile creep and weathering in hydraulic applications of waste containment systems, or geotextile tubes. The research aimed to estimate the durability of geotextiles under tensile creep and field weathering synergism. The experimental design included natural degradation tests between winter/2020 and autumn/2021 alone and with tensile creep, with 15% of the tensile strength load, in seven exposure periods between the climatic seasons. A polypropylene woven geotextile was evaluated as a study example. Results showed the degradation synergism with tensile strength losses greater than 50% (half-life) in 273 days, as well as the influence of climatic dynamics on the durability of the analyzed geotextile. The time of year chosen for installing geotextiles in above-ground applications influences their durability over time. Log-linear mathematical models were obtained in the tests performed. Reliability analysis by failure [$F(UV)$] and survival [$S(UV)$] probabilities with the Weibull distribution, as a function of UV radiation aggregates in decision making inherent to the design constraints. This study can be applied to other geotextiles or geotextile-related products and proved effective in estimating durability by degradation synergism. The research results aimed to contribute a better durability understanding to support decision-making involving mitigating environmental, technical, and social impacts by engineering with geosynthetics.

Key-Words: durability; synergism; geotextiles; reliability analysis; sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Questionamentos feitos ao suporte técnico “GMA Techline” durante período de quatro anos e publicado em 2008.	31
Figura 2 - Comportamento das propriedades dos geossintéticos por tempo.	39
Figura 3 - Árvore de falhas para uma estrutura com elementos de areia encapsulados em geotêxtil.	43
Figura 4 - Vazamento em SCR por falhas na costura do geotêxtil.	43
Figura 5 - Durabilidade de geotêxteis em obras costeiras.	45
Figura 6 - Tipos de tensões geradas em sistemas de confinamento com geotêxteis.	47
Figura 7 - Magnitudes de tensões circunferenciais máximas [T _{máx}] comumente observadas em tubos geotêxteis.	48
Figura 8 - Distribuição da radiação solar com os respectivos comprimentos de ondas.	50
Figura 9 - Incidência de radiação solar global ao longo do ano em função de: (a) Latitude do local; (b) Estações climáticas.	51
Figura 10 - Radiação solar e alguns comprimentos de onda da radiação ultravioleta nocivos a materiais poliméricos.	53
Figura 11 - Ciclo de auto-oxidação das poliolefinas.	54
Figura 12 - Mecanismo de foto-oxidação de polipropileno.	54
Figura 13 - Estação de Radiometria Solar da UNESP, Campus Botucatu, SP.	56
Figura 14 - Correlação linear entre medidas de radiação solar global e radiação ultravioleta a partir da origem na cidade de Botucatu (SP) entre 2001 a 2004.	57
Figura 15 - Correlação linear entre medidas de radiação solar global e radiação ultravioleta nas cidades de Pesqueira e Araripina (Pernambuco) entre 2008 a 2010.	58
Figura 16 - Valores diários dos componentes da radiação solar em função do coeficiente de transmissividade atmosférica entre 2001 a 2005, Botucatu (SP).	59
Figura 17 - Exposições climáticas em campo.	61
Figura 18 - Medidas de temperaturas em geossintéticos expostos à radiação solar.	62
Figura 19 - Durabilidade por intemperismo de geotêxtil tecido de polipropileno.	64

Figura 20 - Comportamento mecânico em microescala de filamento de geotêxtil não-tecido agulhado de polipropileno com acréscimos de temperatura.....	65
Figura 21 - Variabilidade das médias anuais dos totais diários de irradiação global horizontal (em kWh/m ²) entre 2005 e 2015: (a) Todas as regiões brasileiras; (b) Detalhamento para região sudeste.	66
Figura 22 - Principais componentes de um equipamento para ensaios de intemperismo acelerado.	68
Figura 23 - Ensaios de fluência à tração em geossintéticos.	71
Figura 24 - Comportamento sob fluência: (a) Deformação em relação a carga aplicada; (b) Deformação por fluência ao longo do tempo.	72
Figura 25 - Diagrama esquemático das deformações primário, secundário e terciário sob fluência. (a) Tempo em escala aritmética; (b) Tempo em escala logarítmica.	73
Figura 26 - Representação de curvas isócronas de fluência à tração em geossintético.	74
Figura 27 - Exemplificação de curvas ajustadas por fluência à tração em geossintéticos.....	74
Figura 28 - Extrapolação de dados para ruptura à tração por fluência.....	75
Figura 29 - Obtenção da curva de ruptura por fluência à tração pela metodologia de superposição tempo-temperatura.....	76
Figura 30 - Modelo mecânico de deformação por fluência à tração em geossintéticos para carregamento constante de baixa intensidade.....	78
Figura 31 - Modelo mecânico de deformação por fluência à tração em geossintéticos para diferentes níveis de carregamento.	78
Figura 32 - Deformação por fluência em função do polímero e da carga aplicada. ..	80
Figura 33 - Ruptura sob fluência característico para os polímeros PET, PA e PP....	81
Figura 34 - Comportamento típico das fibras longitudinais e transversais em geotêxteis tecidos submetidos a fluência sob tração.	81
Figura 35 - Curvas de fluência à tração de um geotêxtil tecido de polipropileno.....	82
Figura 36 - Curvas isócronas de fluência à tração em polipropileno em diferentes temperaturas.	83
Figura 37 - Ensaios de fluência à tração em geogrelhas de PEAD em cinco níveis de temperaturas.	84
Figura 38 - Equipamento para ensaio de fluência acelerada em laboratório.	85

Figura 39 - Deformação por fluência acelerada em matriz polimérica PP e nanocompósito polimérico NPP com exposição simultânea a radiação UVA.	86
Figura 40 - Ensaio de sinergia de degradação de geossintéticos por fluência à tração.	87
Figura 41 - Modelos de degradação para análises de confiabilidade.....	90
Figura 42 - Diferenciação entre modelos matemáticos.	92
Figura 43 - Função probabilidade da distribuição Normal.	94
Figura 44 - Função densidade de probabilidade de Weibull.	96
Figura 45 - Influência de aditivos nas propriedades mecânicas de geotêxteis não tecidos de polipropileno expostos às intempéries de campo.	98
Figura 46 - Inferência estatística sobre a população a partir de dados amostrais.....	99
Figura 47 - Representação da regressão linear.	102
Figura 48 - Construção de intervalos de confiança a partir das distribuições Normal (Z) e t de Student (T) para população infinita.	103
Figura 49 - Resistência à tração <i>versus</i> irradiância UV acumulada para fibras de polipropileno.	108
Figura 50 - Resultado de regressão polinomial para filamentos de geotêxtil não-tecido de polipropileno a temperaturas de 21° a 50°C.	109
Figura 51 - Modelos matemáticos para o comportamento de intemperismo de campo de geotêxtil tecido de polipropileno.	110
Figura 52 - Fluxograma para a estimativa da probabilidade de durabilidade de geossintéticos por fluência à tração e intemperismo.....	114
Figura 53 - Microscopia óptica do geotêxtil tecido de polipropileno com ampliação de 67x.	115
Figura 54 - Caracterização de massa por unidade de área.	116
Figura 55 - Equipamento para caracterização de espessura.	116
Figura 56 - Equipamento para ensaios mecânicos em geossintéticos.....	117
Figura 57 - Corte à quente de corpos de prova para ensaio de resistência à tração.	118
Figura 58 - Imagem satélite do local de exposição dos geotêxteis ao intemperismo.	120
Figura 59 - Área de pesquisa para estudos de durabilidade de geossintéticos por intemperismo e fluência à tração em campo.	120

Figura 60 - Comportamento climático mensal da cidade de Varginha, Minas Gerais.	122
Figura 61 - Estrutura metálica para ensaios de intemperismo de campo do tipo exposição aberta.	124
Figura 62 - Estrutura metálica para ensaios de sinergismo por fluência à tração e intemperismo.	127
Figura 63 - Sistema de roletes com tubos de alumínio para a transferência da carga de fluência.	127
Figura 64 - Medidas de massa para dimensionamento de carregamento em fluência à tração de 15%.	128
Figura 65 - Amostras de geotêxtil preparadas para a realização da degradação sob fluência à tração e intemperismo de campo.	129
Figura 66 - Detalhes do conjunto garra e fixação da amostra de geotêxtil.	129
Figura 67 - Ajuste final das amostras de geotêxtil no conjunto de garras em morsa de bancada.	130
Figura 68 - Detalhes das regiões para medidas de deformação por fluência à tração.	131
Figura 69 - Utilização de macado hidráulico nos ensaios de fluência.	132
Figura 70 - Verificação do nivelamento final dos pesos posicionados à garra inferior do geotêxtil.	133
Figura 71 - Planejamento dos períodos de ensaios de sinergismo dos fatores de degradação.	134
Figura 72 - Planejamento para a obtenção de corpos de prova nas amostras expostas.	134
Figura 73 - Ensaio de fluência à tração em plano inclinado de 22° em laboratório.	135
Figura 74 - Ensaio de fluência à tração não confinada em laboratório.	136
Figura 75 - Ensaio de fluência com temperatura interna controlada em laboratório.	137
Figura 76 - Curvas de deformação (%) por resistência à tração (kN/m) do geotêxtil tecido de polipropileno intacto.	147
Figura 77 - Distribuição dos resultados amostrais do geotêxtil tecido de polipropileno no sentido longitudinal.	149
Figura 78 - Teste de normalidade por gráfico Q-Q normal.	150

Figura 79 - Distribuição temporal dos parâmetros meteorológicos nos períodos de exposição.	152
Figura 80 - Distribuição percentual dos parâmetros meteorológicos.....	153
Figura 81 - Parâmetros meteorológicos acumulados ao longo dos períodos de exposição.	154
Figura 82 - Acúmulo de partículas sólidas sobre as amostras expostas ao intemperismo registrado no dia 17/08/2020.	154
Figura 83 - Valores médios e variabilidade dos parâmetros climáticos obtidos.	156
Figura 84 - Comparação entre temperatura e amplitude térmicas diárias nas estações climáticas.	157
Figura 85 - Teste de aderência por gráfico Q-Q normal para os resultados amostrais de intemperismo.....	159
Figura 86 - Curvas médias de resistência à tração por deformação para os períodos de exposição por intemperismo.....	160
Figura 87 - Temperaturas registradas no início da primavera de 2020 no local de estudo.	161
Figura 88 - Diagrama de caixas nos períodos de exposição ao intemperismo.	162
Figura 89 - Intervalo de confiança (IC), com nível de confiança de 95%, para os resultados de resistência à tração retidos (kN/m) nos períodos de exposição por intemperismo.....	163
Figura 90 - Comportamento de resistência à tração retida máxima (kN/m) por radiação UV estimada (MJ/m ²).	165
Figura 91 - Desbotamento das áreas delimitadas no geotêxtil nas amostras expostas com tempo acumulado de inverno + primavera + verão + outono.	166
Figura 92 - Deformações acumuladas por fluência à tração sob carga de 15% ao longo do tempo.....	167
Figura 93 - Deformações acumuladas por fluência à tração sob carga de 15% ao longo do tempo.....	168
Figura 94 - Teste de aderência por gráfico Q-Q normal para os resultados amostrais de fluência à tração e intemperismo simultâneos.....	173
Figura 95 - Curvas médias de resistência à tração por deformação para os períodos de exposição por ação simultânea de fluência à tração e intemperismo.	174
Figura 96 - Comparativo de resistências à tração retidos para as exposições ao intemperismo isoladamente e com a ação conjunta de fluência.	175

Figura 97 - Diagrama de caixas para os resultados de resistência à tração retidos (kN/m) nos períodos de exposição por sinergismo de fluência à tração e intemperismo.....	177
Figura 98 - Intervalo de confiança (IC), com nível de confiança de 95%, para os resultados de resistência à tração retidos (kN/m) nos períodos de exposição por sinergismo de fluência à tração e intemperismo.	178
Figura 99 - Comportamento de resistência à tração máxima (kN/m) para exposição simultânea de fluência à tração e intemperismo por radiação UV estimada (MJ/m²).	179
Figura 100 - Deformações acumuladas por fluência à tração sob carga de 15% ao longo do tempo.....	182
Figura 101 - Curvas médias de resistência à tração por deformação para os ensaios de fluência à tração em laboratório.	183
Figura 102 - Resultados de resistência à tração retidos (kN/m) em ensaios de fluência à tração em laboratório.	184
Figura 103 - Parâmetro de forma obtido por regressão linear na distribuição Weibull.	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sumarização dos principais mecanismos de degradação dos geossintéticos.	37
Tabela 2 - Formulações poliméricas usadas na fabricação de geossintéticos (em percentual).	37
Tabela 3 - Comprimento de onda e energia na faixa do ultravioleta.....	50
Tabela 4 - Energias de ligações químicas em polímeros.	52
Tabela 5 - Períodos para exposição de geotêxteis e produtos correlatos durante a instalação.	67
Tabela 6 - Resistência à tração admissível em relação à resistência inicial devido à fluência a 20°C.	80
Tabela 7 - Fatores de redução de geotêxteis sob deformações por fluência.....	88
Tabela 8 - Períodos de exposição do geotêxtil tecido de polipropileno as intempéries.	125
Tabela 9 - ANOVA para um experimento com um único fator.....	140
Tabela 10 - Caracterização do geotêxtil tecido de polipropileno em massa por unidade de área	146
Tabela 11 - Caracterização do geotêxtil tecido de polipropileno por espessura	146
Tabela 12 - Caracterização mecânica do geotêxtil tecido de polipropileno.	148
Tabela 13 - Teste de aderência à distribuição normal, com nível de confiança de 95%, a partir dos dados amostrais do geotêxtil tecido de polipropileno no sentido longitudinal.	149
Tabela 14 - Estimativa do número de corpos de prova para ensaios de durabilidade do geotêxtil tecido de polipropileno.	151
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros meteorológicos nos períodos de ensaio.	151
Tabela 16 - Parâmetros mecânicos retidos médios após períodos de exposição.	158
Tabela 17 - Teste de aderência à distribuição normal, com nível de confiança de 95%, para os resultados amostrais de intemperismo.	158
Tabela 18 - Deformação final média por fluência à tração e intemperismo ($\epsilon_{\text{fluência}}$).	166
Tabela 19 - Funções logarítmicas obtidas dos ensaios de fluência em campo.	170
Tabela 20 - Parâmetros mecânicos retidos após períodos de exposição por sinergismo... ..	171
Tabela 21 - Teste de aderência à distribuição normal, com nível de confiança de 95%, para os resultados amostrais de fluência à tração e intemperismo simultâneos.	172
Tabela 22 - ANOVA para os períodos de exposição isoladamente.....	175
Tabela 23 - Análise da mínima diferença significativa (MDS) entre os períodos de exposição.	176
Tabela 24 - Deformação final média por fluência à tração em laboratório.....	181
Tabela 25 - Funções logarítmicas obtidas dos ensaios de fluência em laboratório	181
Tabela 26 - Parâmetros mecânicos retidos após ensaio em laboratório	183

Tabela 27 - Fatores de redução parciais (FRp).....	186
Tabela 28 - Probabilidades em função de resistências à tração retidas.....	187
Tabela 29 - Teste de aderência à distribuição Weibull, com nível de confiança de 95%, para os resultados amostrais de fluência à tração e intemperismo simultâneos.	188
Tabela 30 - Obtenção de parâmetros da distribuição Weibull.	188
Tabela 31 - Parâmetros das probabilidades de falha e de sobrevivência.....	189

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM - American Society for Testing and Materials
CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica-Minas Gerais
CV - Coeficiente de variação
ETA - Estação de tratamento de água
ETE - Estação de tratamento de esgoto
fdp - Função densidade de probabilidade
FR - Fator de redução
G - Radiação solar global
GBR-P - Barreiras geossintéticas poliméricas ou geomembranas
GSY - Geossintéticos
GTX - Geotêxtil
GTX-W - Geotêxtil tecido
IC - Intervalo de confiança
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
MDS - Mínima diferença significativa
MMQ - Métodos dos mínimos quadrados
NIR - Radiação infravermelho
PA - Poliamida
PAR - Radiação fotossinteticamente ativa
PE - Polietileno
PEAD - Polietileno de alta densidade
PET - Poliéster ou politereftalato de etileno
PP - Polipropileno
PS - Poliestireno
PVC - Policlorato de vinila
SCR - Sistema de confinamento de resíduos
UV - Radiação ultravioleta
UVI - Índice ultravioleta
VN - Valor nominal
VT - Valor total

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$ - graus Celsius

% - percentual

ε - deformação (%)

$\varepsilon_{\text{máx}}$ - deformação à carga máxima (%)

ρA - massa por unidade de área (g/m^2)

d - espessura (mm)

hs - horas

K_T - coeficiente de transmissividade atmosférica

kJ/mol - quilojoule por mol

kWh/m^2 - quilowatt-hora por metro quadrado

m^2 - metro quadrado

min - minutos

MJ/m^2 - megajoule por metro quadrado

MPa - megapascal

nm - nanômetros

R^2 - coeficiente de determinação

$T_{\text{máx}}$ - resistência à tração máxima (kN/m)

W/m^2 – irradiância

$F(\text{UV})$ - probabilidade de falha

$S(\text{UV})$ - probabilidade de sobrevivência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	25
1.2 OBJETIVO DA PESQUISA	29
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	29
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	30
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	30
1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	32
1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	33
2 DURABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS	36
2.1 CONCEITOS INICIAIS.....	36
2.2 APLICABILIDADE DE GEOTÊXTEIS SOB FLUÊNCIA À TRAÇÃO E INTEMPERISMO	42
2.3 DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS POR INTEMPÉRIES	49
2.3.1 <i>Efeitos nocivos da radiação ultravioleta</i>	49
2.3.2 <i>Incidência estimada de radiação UV no Brasil</i>	55
2.3.3 <i>Ensaio de Durabilidade por Intemperismo de Campo</i>	59
2.4 DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS POR FLUÊNCIA À TRAÇÃO	69
2.4.1 <i>Introdução</i>	69
2.4.2 <i>Ensaio de fluência em geossintéticos</i>	70
2.4.3 <i>Modelo reológico de fluência à tração</i>	77
2.4.4 <i>Fatores que influenciam o comportamento à fluência por tração</i>	79
3 MODELOS PROBABILÍSTICOS E FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA AVALIAÇÕES DE DURABILIDADE E CONFIABILIDADE.....	89
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	89
3.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ANÁLISE DE DURABILIDADE	91
3.2.1 <i>Introdução</i>	91
3.2.2 <i>Modelos probabilísticos</i>	94
3.3 INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS DA VARIÁVEL RESPOSTA	99
3.3.1 <i>Considerações iniciais</i>	99
3.3.2 <i>Análise de variância (ANOVA)</i>	100
3.3.3 <i>Regressão linear</i>	102
3.3.4 <i>Intervalos de confiança (IC)</i>	103
3.4 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE.....	104
3.5 MODELOS DE DEGRADAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS	106
3.5.1 <i>Degradação por intemperismo</i>	106
3.5.2 <i>Degradação por fluência à tração</i>	111

3.6 ADEQUAÇÃO DE MODELOS PROBABILÍSTICOS POR ANÁLISE DE RESÍDUOS ...	111
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	113
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	113
4.2 MATERIAL EMPREGADO NA PESQUISA.....	114
4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	115
4.4 CÁLCULO DO TAMANHO AMOSTRAL.....	118
4.5 ENSAIOS DE DURABILIDADE POR SINERGIA DE FLUÊNCIA À TRAÇÃO E INTEMPERISMO.....	119
4.5.1 Durabilidade por intemperismo de campo.....	119
4.5.2 Durabilidade por sinergismo de fluência à tração e intemperismo de campo	126
4.5.3 Durabilidade por fluência à tração em laboratório.....	135
4.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO E ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA DURABILIDADE 137	
4.6.1 Teste de hipóteses de aderência à distribuição normal.....	137
4.6.2 Comparação entre médias amostrais.....	139
4.6.3 Inferências estatísticas amostrais e populacionais.....	141
4.6.4 Inferências probabilísticas de durabilidade por sinergismo	141
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	146
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO GEOTÊXTIL TECIDO DE POLIPROPILENO.....	146
5.2 CÁLCULO DO TAMANHO AMOSTRAL.....	150
5.3 DURABILIDADE POR INTEMPERISMO.....	151
5.3.1 Tratamento estatístico dos parâmetros meteorológicos.....	151
5.3.2 Parâmetros mecânicos retidos por tempos de exposição	157
5.4 DURABILIDADE POR SINERGISMO DE FLUÊNCIA À TRAÇÃO E INTEMPERISMO	165
5.4.1 Deformações por fluência ao longo do tempo de exposição	165
5.4.2 Parâmetros mecânicos retidos por tempo de exposição	171
5.5 DURABILIDADE POR FLUÊNCIA À TRAÇÃO EM LABORATÓRIO.....	180
5.5.1 Deformações por fluência ao longo do tempo.....	180
5.5.2 Resistência à tração retida para fluência em laboratório.....	183
5.6 FATORES DE REDUÇÃO PARA A DURABILIDADE POR SINERGISMO	185
5.7 ANÁLISE PROBABILÍSTICA PARA A DURABILIDADE POR SINERGISMO.....	187
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	191
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	191
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	195
REFERÊNCIAS.....	197

APÊNDICE A – EXEMPLOS DE REGISTROS HISTÓRICOS DE EXUMAÇÕES DE GEOSINTÉTICOS DE CAMPO	206
APÊNDICE B – APLICABILIDADE DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS COSTEIRAS E TUBOS GEOTÊXTEIS PARA DESAGUAMENTO E CONFINAMENTO DE RESÍDUOS.....	210
APÊNDICE C – COMPLEMENTAÇÃO SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS E FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS	225
APÊNDICE D – ROTINAS DO SOFTWARE R.....	231

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Geossintéticos (GSY) são produtos manufaturados com polímero sintético (“geo + sintético”), na grande totalidade, ou polímero natural e empregados comumente em contato com solo. Podem apresentar formatos de manta, tira ou estrutura tridimensional e desempenhar funções de reforço, filtração, drenagem, proteção, separação, barreira, controle de erosão superficial, alívio de tensões e estabilização (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021). Dentre os diferentes tipos de geossintéticos, destaca-se o geotêxtil (GTX), material permeável e de estrutura plana (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021) e largamente usado por desempenharem distintas funções (Carneiro; Almeida; Lopes, 2014).

As primeiras aplicações de geossintéticos datam da década de 1950, com a fabricação de tecidos para uso como camada de separação e filtração entre solos granulares e de baixa carga, bem como aplicação em projetos costeiros na Holanda e nos Estados Unidos em sistemas de filtração críticos (Shukla; Yin, 2006). O incentivo a fabricação de geotêxteis pode ter ocorrido por escassez de fibras naturais nesta época (ISO/TS 13434, 2020). Somente em 1994, o nome geossintético surgiu durante o 4º Congresso Internacional de Geotêxteis, Geomembranas e Produtos Relacionados, em Cingapura, designação atribuída a materiais fabricados que utilizam ou não polímeros sintéticos (Lopes; Lopes, 2010).

O surgimento da engenharia com geossintéticos, e os avanços tecnológicos na sintetização de novos produtos nas últimas décadas, está diretamente relacionada aos avanços na Ciência dos Polímeros no século XX. De acordo com Hage Júnior (1998), o domínio das técnicas de polimerização impulsionou grande parte das mudanças tecnológicas no último século e a sua continuidade nas décadas correntes; por exemplo, o surgimento de fibras têxteis de Nylon 6,6 e da polimerização por fusão do politereftalato de etileno (PET) como fibra têxtil nas décadas de 1930 e 1940, respectivamente.

A despeito de sua origem recente, em comparação a demais materiais convencionais empregados na engenharia civil, os geossintéticos têm se desenvolvido rapidamente devido, entre outros fatores, à facilidade de instalação e transporte, potenciais aplicações em projetos emergenciais, custos competitivos em comparação com projetos geotécnicos convencionais em diferentes âmbitos (ISO/TS 13434, 2020;

Li *et al.*, 2018; Lopes; Lopes, 2010). Outras vantagens, também, incluem a possibilidade em substituir recursos naturais escassos, tais como solos e rochas, e demais materiais de engenharia civil, bem como viabilizar projetos de maiores complexidades (Koerner, 2012). Conforme Lopes e Barroso (2021), é possível afirmar que os materiais geossintéticos influenciaram em muitos projetos de engenharia civil nos últimos trinta anos.

Na atual era do Antropoceno, termo iniciado na década de 90 (século XX) que caracteriza uma nova era biogeológica regida pela atuação do homem na transformação do espaço geográfico, ecossistema e na escala do tempo geológico (Pinto; Pires; Georges, 2020), têm sido pautados projetos de engenharia com o objetivo de solucionar as inúmeras necessidades da sociedade, como moradia, acessibilidade, infraestrutura urbana, saneamento básico, dentre outros. Portanto, a busca pelo desenvolvimento sustentável com a mitigação de impactos negativos em termos sociais, ambientais e econômicos a atual e futuras gerações.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi consolidado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, da Organização das Nações Unidas (ONU), por meio do Relatório de Brundtland (1987), que afirma ser “[...] aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades” (CMMAD, 1988 *apud* Barbieri, 1997, p. 23)¹.

Discussões sobre o desenvolvimento sustentável e de ações que visam a mitigação dos impactos antrópicos ao Planeta Terra têm sido pauta de discussões junto aos países membros da ONU desde os anos de 1970, principalmente as que tratam das mudanças climáticas e seus impactos socioambientais e eventos extremos climáticos. Dentre esses, a aceleração exponencial no aquecimento global por emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), como o gás carbônico (CO₂), e na busca por alternativas que absorvam esses excessos na atmosfera e à proteção dos recursos naturais (Marques, 2022).

¹ Importante mencionar o Artigo 225 da Constituição Federal, no qual aborda que “[...] todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida [...]”, com incumbência ao poder público de prover a coletividade à defesa e preservação do meio ambiente a atual e futuras gerações (Brasil, 1988).

Em setembro de 2015, em reunião na sede da ONU foi declarada a Agenda 2030, conjunto de 17 (dezessete) objetivos e 169 (cento e sessenta e nove) metas integradas e indissociáveis para serem colocados em prática ao longo dos 15 anos subsequentes denominados de novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) globais. A nova agenda intitulada “Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” compreende um plano de ação para a evolução dos oito Objetivos de Desenvolvimento de Milênio (ODM) da Agenda Global do Desenvolvimento 2000-2015 e busca atingir as metas inacabadas (Nações Unidas Brasil, 2015).

A engenharia com geossintéticos apresenta soluções técnicas, econômicas e ambientais no enfrentamento aos desafios correntes no âmbito dos novos ODS globais por inúmeras ações resilientes. Exemplificam-se (International Geosynthetic Society, 2021): desenvolvimentos econômicos em projetos de engenharia civil, com menores custos de materiais, em relação aos convencionais, redução de impactos em substituição aos recursos naturais (solos e rochas) e menores gerações de resíduos, além de rapidez construtiva (ODS 1, 8, 9, 10 e 17); auxílios no controle, armazenamento e distribuição de água no combate à escassez hídrica (ODS 6); obras de infraestrutura de transportes para a conexão de pessoas (ODS 11); proteções ao meio ambiente contra a contaminação de solos, recursos hídricos e menores emissões de GEE (ODS 13 e 15) melhorias na eficiência agrícola e controle de gases nocivos emitidos nestas operações e, assim, auxiliar no desabastecimento de alimentos (ODS 2).

Reporta-se, também, as Convenções Quadro das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), tratado firmado na Rio-92 para estabelecer compromissos e obrigações multilaterais aos 189 países membros frente às mudanças climáticas. Tais convenções ocorrem anualmente para avaliar os progressos alcançados pelos países membros e estabelecer novas obrigações conjuntas. Estas são balizadas no “princípio da responsabilidade comum, mas diferenciada”, ou seja, as ações formuladas consideram as distintas realidades dos países membros (IPEA, 2010). Em novembro

de 2022, ocorreu a 27ª Conferência das Partes (COP) das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP 27), como parte destas convenções anuais².

A engenharia com geossintéticos têm um papel de vanguarda nestes cenários, pois suas inúmeras aplicações contribuem na melhoria da qualidade de vida da população e mitigações nas mudanças climáticas. Exemplificam-se reduções na extração de recursos naturais e nas emissões de GEE por transporte destes em grandes volumes, proteção da vegetação natural com captura de CO₂ e mitigação de processos erosivos, alternativas econômicas em inúmeras intervenções geotécnicas (Dixon; Fowmes; Frost, 2017; Touze, 2021). Ademais, a manufatura de produtos poliméricos tende a consumir menores energias se comparado a outros materiais de engenharia, como produtos metálicos, assim como maior rapidez e facilidades de construção, boa eficiência em termos de comportamento e durabilidade (Palmeira, 2018).

Neste contexto, a aplicabilidade dos materiais geossintéticos aos inúmeros projetos de engenharia quer o conhecimento da sua durabilidade frente aos fatores de degradação próprios do meio ambiente e as solicitações de instalação e uso nas suas propriedades. Em termos macro, a durabilidade de geossintéticos refere-se à capacidade de desempenhar satisfatoriamente as suas funções com a garantia de propriedades disponíveis em níveis aceitáveis durante o tempo de vida de projeto (ASTM D 5819, 2022; ISO/TS 13434, 2020). Compreendem-se análises desde a estrutura polimérica dos geossintéticos, processos de fabricação, condições de armazenamento e instalação, as tipologias das solicitações que possam implicar em processos de degradação, dentre outros (Lopes; Lopes, 2010; Shukla, 2016).

Como critérios primários de análise, considera-se que para os geossintéticos recobertos, os principais fatores que possam afetar a sua durabilidade são o tamanho das partículas do solo e sua angularidade, que aumentam os danos mecânicos, acidez e alcalinidade do solo (que dependem da formação geológica) e dos fluidos, influência da superfície, temperatura, presença de íons metálicos, oxigênio, umidade, conteúdo

² A Lei 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), reforça em seu Artigo 3 o “princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada” reportado em Convenção do Quadro das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas, com destaque ao seu inciso I, em que “[...] todos têm o dever de atuar, em benefício das presentes e futuras gerações, para a redução dos impactos decorrentes das interferências antrópicas sobre o sistema climático” (Brasil, 2009).

orgânico (por exemplo, fenóis e ácidos orgânicos), microrganismos e ataque químico por fluidos contaminados. Para aplicações expostas, acrescentam-se a dinâmica climática, como radiação ultravioleta (UV), maiores temperaturas e as amplitudes térmicas diárias, precipitação, ozônio, poluentes, dentre outros (ISO/TS 13434, 2020; Shukla; Yin, 2006).

Pesquisas direcionadas a análise da durabilidade de geossintéticos aos distintos fatores de degradação têm sido realizadas principalmente nas duas últimas décadas e ainda é considerada uma temática complexa devido às inúmeras variáveis envolvidas. Dentre os fatores de degradação, destacam-se as solicitações mecânicas por fluência à tração e o intemperismo, particularmente a parcela de radiação ultravioleta incidente em conjunto a demais dinâmica climática própria do local de uso, e solicitações mecânicas por fluência à tração. Ademais, ressalva-se a ponderação em projeto para as atuais mudanças climáticas em aplicações acima do solo com vida de projeto de médio e de longo prazos, como o aumento do índice ultravioleta (IUV), da temperatura média atmosférica, poluição, dentre outras.

Por exemplo, o emprego de geotêxteis e produtos correlatos aos geotêxteis expostos simultaneamente ao intemperismo e solicitações mecânicas por fluência à tração, tais como sistemas de confinamento de resíduos (SCR), ou tubos geotêxteis, obras costeiras emergenciais, dentre outras (Assinder *et al.*, 2016; Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012; Hsieh; Wang; Chiu, 2006; Lawson, 2016).

O desempenho adequado da engenharia com geossintéticos está atrelado ao entendimento holístico dos mecanismos de degradação de forma isolada e os efeitos da sinergia dos fatores envolvidos em suas inúmeras aplicações (Carneiro; Almeida; Lopes, 2014; Koerner; Hsuan; Koerner, 2017; Lopes; Lopes, 2010; Urashima, 2022).

Portanto, foi estabelecida a seguinte hipótese para a durabilidade por sinergismo entre fluência à tração e intemperismo: solicitação mecânica de fluência à tração altera os processos de degradação por intemperismo de campo, de modo que os fatores de degradação não devem ser tratados como eventos isolados, mas sim sinergicamente.

1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

Estimar a durabilidade de geotêxteis sob sinergismo de fatores de degradação por fluência à tração e intemperismo de campo.

1.2.2 Objetivos Específicos

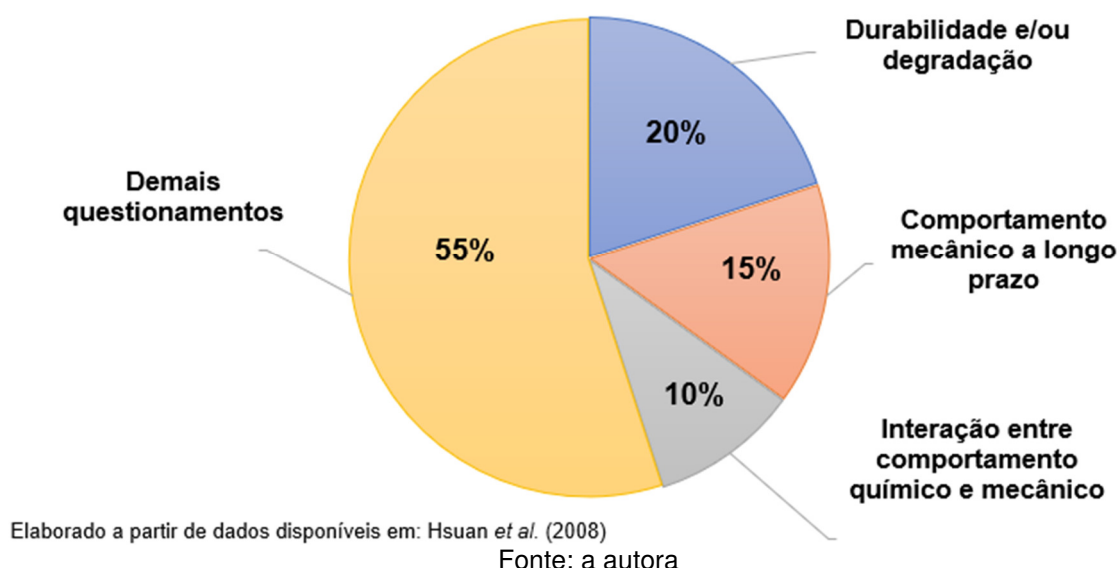
Como objetivos específicos deste trabalho, destacam-se:

- obter a caracterização física e mecânica do material geotêxtil escolhido para o estudo a partir de normas vigentes;
- realizar ensaios de durabilidade pela exposição conjunta e isolada de amostras de geotêxtil sob fluência à tração e intemperismo de campo;
- ponderar sobre a influência da dinâmica climática como fator relevante à durabilidade por sinergismo ao longo do tempo;
- realizar ensaios de fluência à tração em laboratório de modo a validar a metodologia de fluência à tração inclinada, bem como avaliar o sinergismo dos fatores de degradação;
- obter fatores de redução parciais (FR), para fins de pesquisa, nas condições experimentais delineadas;
- estimar a durabilidade de geotêxteis por ferramentas estatísticas amostrais e populacionais e análises probabilísticas, a partir de resultados de resistência à tração e deformação máximas do material intacto e após as condições de contorno estabelecidos nas campanhas experimentais por ensaios de campo;
- aplicar a metodologia de análise de confiabilidade por distribuição Weibull de probabilidades de falha e de sobrevivência em função de incidências de radiação UV estimadas para os períodos de degradação natural analisados.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Nas duas últimas décadas, a análise da durabilidade dos geossintéticos tem sido reportada pela comunidade científica, projetistas e fabricantes como um importante aspecto a ser ponderado a estes materiais, mediante pesquisas de campo e/ou laboratório em distintos âmbitos. Uma pesquisa publicada em evento internacional de geossintéticos (Hsuan *et al.*, 2008), e recentemente abordado por Koerner, Hsuan e Koerner (2017), reportou que o serviço de suporte técnico da “GMA Techline” (*Geosynthetic Materials Association*), recebeu distintas perguntas, em período analisado de quatro anos, das quais 45% (quarenta e cinco por cento) dos questionamentos foram referentes a temática durabilidade de geossintéticos, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Questionamentos feitos ao suporte técnico “GMA Techline” durante período de quatro anos e publicado em 2008.



Vale ressaltar que grande parte das aplicações com geossintéticos ainda não atingiram a vida de serviço de projeto por serem produtos de engenharia recentes, com as primeiras aplicações datarem da década de 50, bem como ser provável que os materiais geossintéticos disponíveis no mercado, nas últimas décadas, apresentem matrizes poliméricas distintas das aplicações iniciais.

Distintas publicações, principalmente nas últimas três décadas, discorreram sobre análises de durabilidade de geossintéticos a partir de amostras exumadas de aplicações que contemplam vida de projeto de curto e médio prazos. Os registros históricos disponíveis ainda são incipientes ao se considerar as expectativas de vida de serviço de projeto superiores a 100 anos, mas que tem ocorrido uma crescente confiança na durabilidade dos geossintéticos com os resultados históricos de exumações e amadurecimentos na tecnologia de processamento de geossintéticos (ISO/TS 13434, 2020).

A norma ISO 13437 (2019) padroniza condições para a instalação e recuperação de amostras de geossintéticos para análise de durabilidade, cujos resultados são de suma relevância juntamente a demais registros históricos de exumações, exemplificados no Apêndice A. Leshchinsky *et al.* (2020) abordaram a importância da compilação destes resultados de exumação, inclusive com a evidência de quanto conservadoras (ou não conservadoras) tem sido os dimensionamentos de projetos de longo prazo. Os autores supracitados também destacaram a relevância de pesquisas

adicionais para elucidar a potencial não linearidade no comportamento das propriedades disponíveis de projeto dependentes do tempo.

Conforme enfatizado por Cazzuffi e Giofrè (2020), ainda há dificuldades de se estabelecer parâmetros de vida útil de projeto, pois são dependentes de elementos externos do local de uso. Além disso, destaca-se como desafio acerca do estudo da durabilidade de geossintéticos a variabilidade inerente na composição das matrizes poliméricas, uma vez que polímeros advindos de mesmos monômeros podem apresentar estruturas distintas, assim como a presença de aditivos químicos em faixas percentuais distintas.

As normas que se destinam à orientação de fabricantes e projetistas quanto à durabilidade dos geossintéticos e fornecimento de diretrizes para a sua avaliação, tais como ABNT NBR 16757-1 (2021), ABNT NBR 16757-2 (2020) e ISO/TS 13434 (2020), são de suma importância e garantem uma durabilidade mínima para meio ambiente normal, ou seja, solos e águas naturais com pH de 4 a 9 e temperatura do solo de até 25 °C, a partir de ensaios índices, ou seja, sob condições padronizadas, e delimitam o tempo de vida de serviço de projeto com as devidas margens de segurança entre as propriedades disponível e requerida. Todavia, não englobam a avaliação da durabilidade em condições de aplicação diferentes do padrão, por exemplo, com mecanismos de degradação por efeito de sinergismo. As referidas análises devem ser ponderadas mesmo com a ausência de ensaios padronizados que possam fazer tais inferências de durabilidade e com o emprego de parâmetros técnicos disponíveis por ensaios índices e/ou fornecidos pelo fabricante (Bezuijen; Vasternburg, 2013).

Portanto, o presente trabalho pretende contribuir no entendimento da durabilidade dos geossintéticos junto à comunidade científica, projetistas e fabricantes, na medida que tais conhecimentos agregam na confiabilidade de inúmeros projetos com tomadas de decisões racionais por critérios técnicos, econômicos e ambientais. Ou seja, o atendimento às novas demandas emergenciais globais ou pontuais na engenharia civil (Dixon; Fowmes; Frost, 2017; ISO/TS 13434, 2020; Touze, 2021).

1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como restrições da pesquisa, enumeram-se:

- não foram realizados ensaios microestruturais no geotêxtil empregado na pesquisa para correlacionar com as alterações macroestruturais. Apesar da relevância destes em elucidar os fenômenos macroestruturais, são os parâmetros

macroestruturais (por exemplo, resistência à tração máxima) aplicados diretamente para inferir sobre os fatores de redução parciais (RF_p) empregados no dimensionamento de geossintéticos (Shukla, 2016);

- emprego de um geotêxtil tecido de polipropileno, para fins de pesquisa e que não é empregado exposto ao intemperismo, como exemplificação para a estimativa de durabilidade por sinergismo em ensaios de degradação em campo.
- resultados preliminares fluência à tração não convencional foram publicados anteriormente (Guimarães *et al.*, 2017). Neste trabalho, engloba-se a validação da referida metodologia com ensaios de fluência à tração convencional em laboratório;
- realizar ensaios de sinergismo com apenas um nível de carga de fluência à tração e de menor intensidade (15% da resistência à tração máxima), devido a metodologia de solicitação por cargas estáticas. Para o geotêxtil utilizado na pesquisa, requer a aplicação de 210kg de carga estática em cada réplica analisada;

Como limitações da pesquisa, enumeram-se:

- ponderar a durabilidade do geotêxtil apenas por propriedades mecânicas, mesmo de conhecimento acerca da influência dos mecanismos de degradação também em termos de propriedades físicas e hidráulicas;
- avaliar probabilidades de falha e de sobrevivência por análises de confiabilidade por conceitos de degradação natural, ao invés de tempos de vida por ensaios acelerados. Para tanto, o planejamento experimental estabeleceu os períodos de exposição, com registros das respectivas incidências de radiação UV estimadas, e inferências probabilísticas por percentuais de resistência à tração retidos (níveis de censuras) como limite de degradação;
- modelos matemáticos obtidos por regressão, que melhor se ajustaram aos resultados amostrais, são particulares às condições analisadas devido à dinâmica climática e períodos de degradação natural analisados.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A estruturação desta Tese de Doutorado contempla os seguintes capítulos:

Capítulo 2 - DURABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS: abordagem dos conceitos normativos de durabilidade, sumarização dos principais fatores de degradação que podem afetar as propriedades dos geossintéticos e dimensionamentos por fatores de redução parciais e fator de incertezas, exemplos de aplicações de geossintéticos em

contato com intemperismo e fluência à tração como em sistemas de confinamento de resíduos, conceitos sobre a durabilidade por tais fatores, as principais variáveis envolvidas e a ação sobre as distintas matrizes poliméricas, com abordagens de pesquisas já publicadas.

Capítulo 3 - MODELOS PROBABILÍSTICOS E FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA AVALIAÇÃO DE DURABILIDADE E CONFIABILIDADE: contextualização sobre a importância de inferências probabilísticas e estatísticas em prognosticar a durabilidade dos geossintéticos, alguns destes empregados em demais materiais de engenharia, o qual incluem modelos determinísticos, probabilísticos e ferramentas estatísticas para inferências amostrais, a partir de ensaios de degradação natural ou acelerado, bem como análise de confiabilidade por probabilidades de falha e de sobrevivência para tempo de vida útil ou um limite de falha especificado (censura).

Capítulo 4 - MATERIAL E MÉTODOS: detalhamento do planejamento experimental adotado na pesquisa, como a escolha do geossintético empregado, cálculo do tamanho amostral e dimensões das amostras em réplicas, ensaios de caracterização em laboratório, planejamento e realização de ensaios de durabilidade por fluência à tração e intemperismo de campo, quais os fatores adotados e as variáveis respostas a serem analisadas por parâmetros amostrais e populacionais, inferências probabilísticas de falha e de sobrevivência em relação a incidências de radiação UV para os períodos de degradação natural analisados por distribuição Weibull.

Capítulo 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES: Análise de resultados obtidos dos ensaios de durabilidade, como a caracterização física e mecânica do geotêxtil tecido de polipropileno e testes de aderência à distribuição Normal, sumarização dos parâmetros meteorológicos para os períodos de ensaios, inferências estatísticas e probabilísticas dos resultados mecânicos retidos por fluência à tração e intemperismo isolados e simultaneamente, deformações superficiais por fluência à tração e taxas de deformação a partir de função logarítmica, obtenção de modelos matemáticos às condições de estudo analisados, validação da metodologia de ensaio de fluência à tração não convencional para a estimativa de durabilidade por sinergismo e probabilidades de falha e de sobrevivência do geotêxtil tecido de polipropileno por sinergismo.

Capítulo 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS: Sumarização das principais considerações obtidas, bem como a

importância dos estudos sobre a durabilidade dos geossintéticos, devido ao aumento nas aplicações destes materiais em distintos projetos de engenharia civil e de desenvolvimento sustentável, e a complexidade acerca do sinergismo entre os fatores de degradação.

REFERÊNCIAS: listagem das bibliografias consultadas para embasamento e estruturação desta pesquisa.

APÊNDICES: sumarização de exemplos de registros históricos de exumações de geossintéticos em campo (Apêndice A); apresentação de informações que complementam a pesquisa realizada, como aplicações de geotêxteis submetidos a fluência à tração e intemperismo simultaneamente, tais como obras costeiras e tubos de geotêxteis para desaguamento e confinamento de resíduos (Apêndice B); descrição sucinta de modelos determinísticos e principais leis de falhas aplicadas a análises de confiabilidade (Apêndice C); rotinas do *software* R aplicados aos resultados amostrais (Apêndice D).

2 DURABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS

2.1 CONCEITOS INICIAIS

A durabilidade de um geossintético pode ser compreendida como a capacidade de desempenhar satisfatoriamente as funções para as quais foram dimensionados, com a garantia que as propriedades disponíveis atendam às propriedades requeridas, em níveis aceitáveis durante o tempo de vida de serviço de projeto em contato com fatores de degradação (ISO/TS 13434, 2020). A durabilidade também pode ser definida como a resistência do geossintético ao envelhecimento, que são alterações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas ocasionadas pelo efeito das condições ambientais de exposição acima ou abaixo do solo (ASTM D 5819, 2022; Shukla, 2016). A degradação refere-se em atingir valores das propriedades disponíveis abaixo do nível mínimo esperado para o desempenho das funções especificadas para a vida de serviço de projeto durante o envelhecimento, ou vida operacional, dos geossintéticos (ISO/TS 13434, 2020).

A vida de projeto corresponde ao “período de tempo desde o início da instalação até o ponto no qual o material não mais atende às propriedades requeridas no projeto para desempenhar sua função dentro dos limites definidos” (ABNT NBR 10318-1, 2021, p. 8). Pode ser estabelecida como de curto prazo (inferior a 5 anos), uso temporário (inferior a 25 anos) ou de uso permanente (acima de 25 anos e normalmente de 50 a mais de 100 anos) em função da usabilidade destinada aos geossintéticos, das condições ambientais e dos possíveis impactos inerentes a degradação do material (ISO/TS 13434, 2020).

Devido à formulação polimérica dos geossintéticos, estes apresentam comportamento termo-visco-elasto-plástico (Perkins, 2000), cuja durabilidade é dependente de sua constituição polimérica (Tabela 1), condições de uso, ambiente, temperatura, solicitações mecânicas (nível, taxa e durabilidade), dentre outras (Allen, 2016; Maxwell *et al.*, 2005). Além da constituição polimérica principal, a durabilidade destes materiais é dependente da incorporação de aditivos na resina polimérica primária (Tabela 2), sejam na forma particulada ou líquida, o qual correspondem de 1% até 50% das formulações em massa (Koerner, 2012). Apesar da importância dos aditivos para garantir a durabilidade dos geossintéticos, este trabalho não tem como intuito ponderar acerca da influência dos aditivos nos estudos de durabilidade realizados no planejamento experimental.

Tabela 1 - Sumarização dos principais mecanismos de degradação dos geossintéticos.

Mecanismos	Polímeros			
	Polietileno (PE)	Polipropileno (PP)	Poliéster (PET)	Policloreto de Vinila (PVC)
Radiação UV	Importante para todos os polímeros, apenas se exposto			
Oxidação	Preocupação para todas as resinas, mas em graus variados			
Hidrólise	Nenhuma preocupação importante, exceto PET com valores baixos e altos de pH			
Química	Preocupação com produtos químicos agressivos, como hidrocarbonetos, para todas as resinas			
Radioativa	Apenas preocupação com relação aos resíduos com alto nível de radioatividade			
Biológica	Nenhuma preocupação com bactérias e fungos			
Migração	Nenhuma preocupação, exceto para plastificantes			
Temperatura	O calor acelera todos os mecanismos acima			

Fonte: Koerner; Hsuan; Koerner, 2017. Adaptada pela autora.

Tabela 2 - Formulações poliméricas usadas na fabricação de geossintéticos (em percentual).

Tipo de polímero	Resina	Enchimento	Pigmento ou negro de fumo	Aditivos*	Plastificantes
Polietileno (PE)	95-98	0	2-3	0,5-2,0	0
Polipropileno (PP)	85-96	0-13	2-3	1-2	0
Policloreto de vinila (PVC), plastificado	30-40	20-30	5-10	2-3	25-30
Poliéster (PET)	96-98	0	2-3	0,5-1,0	0
Poliamida (PA)	96-98	0	2-3	0,5-1,0	0
Poliestireno (PS)	96-98	0	2-3	0,5-1,0	0

* OBSERVAÇÃO: Aditivos incluem estabilizantes, antioxidantes, corantes e auxiliares de processamento.

Fonte: Koerner, 2012; Hsuan *et al.*, 2008. Adaptada pela autora.

As normas ASTM D 5819 (2022) e ISO/TS 13434 (2020) fornecem diretrizes para avaliação da durabilidade dos geossintéticos a partir de ensaios normatizados. Contextualizam a importância e a problemática da durabilidade para estes materiais, além de citarem quais são os parâmetros que regem esse comportamento, tais como: estrutura física do geossintético, natureza do polímero utilizado, processo de fabricação, ambiente físico e químico, condições de armazenamento, instalação e solicitações de projeto impostas aos geossintéticos.

Recomendações normativas brasileiras para geotêxteis e produtos correlatos (ABNT NBR 16757-1, 2021) e barreiras geossintéticas (ABNT NBR 16757-2, 2020) tratam de requisitos e procedimentos aplicáveis aos fabricantes e distribuidores de produtos geossintéticos. Estas visam fornecer informações para adequadas especificações de projetos com geossintéticos, que englobam a avaliação da durabilidade por intemperismo e vida de serviço em condição ambiente normal, solos e águas naturais com pH de 4 a 9 e temperatura do solo de até 25 °C, além de disponibilizar a declaração de desempenho destes produtos entregues nas obras. A avaliação da durabilidade engloba a realização de ensaios acelerados para se garantir o desempenho em vida de serviço de projeto de até 25 anos. Ademais, contemplam

a realização de controle de qualidade da matéria-prima e do processo de fabricação, quais são as propriedades a serem controladas, as respectivas normas para tais ensaios e frequências mínimas de testes, além dos resultados destas propriedades índices serem informados em função de valores nominais (VN) e valores de tolerância (VT) para um nível de confiança de 95%.

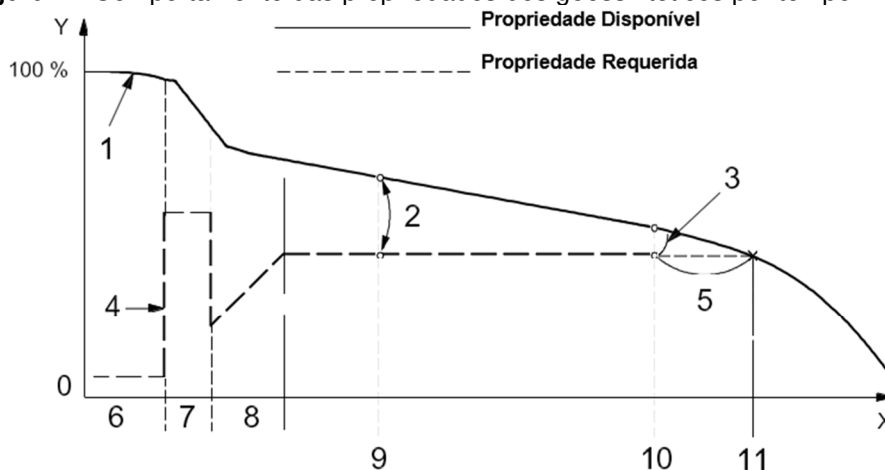
Destaca-se a norma ABNT NBR ISO 10320 (2021), que especifica as condições de identificação de produtos geossintéticos entregues em obras para se estabelecer uma correta identificação de bobinas em futuras rastreabilidades entre fornecedor e comprador. Isto é de suma importância, inclusive, no acompanhamento das condições de instalação e armazenagem de produtos em obras, condições essenciais para a garantia de durabilidade.

A norma ISO/TS 13434 (2020) discorre sobre os critérios de avaliação da durabilidade de geossintéticos para tempos de vida de serviço de até 100 anos, também sob meio ambiente normal, a partir de ensaios de durabilidade índice, ou de triagem, estabelecidos para se avaliar a durabilidade mínima em serviço e excluir produtos em que há questionamentos acerca de sua durabilidade. Em aplicações sob condições ambientais mais severas ou vidas de serviço de projeto superior a 100 anos, a norma supramencionada destaca que ensaios em condições especiais são necessários, bem como em aplicações que envolvem complexas combinações e interações de inúmeros parâmetros ambientais e de serviço. Também, a previsão de durabilidade para tempo de vida de serviço maior que 100 anos deve ser feita com ponderações conjuntas de experiências, ou extrapolações, de exumações e ensaios acelerados, assim como a realização dos ensaios índice básicos.

O comportamento das propriedades dos geossintéticos ao longo do tempo é exemplificado na Figura 2. Entende-se como propriedade requerida (item 4) o nível mínimo aceitável para que o geossintético desempenhe, de modo satisfatório, as funções pretendidas e definidas em projeto como propriedade funcional (eixo Y). Deste modo, é considerada uma margem de segurança (item 3) para a vida de projeto, que é a diferença entre a propriedade disponível e a propriedade requerida previstas. A propriedade disponível (item 1) corresponde ao comportamento ao longo do tempo, cujo valor inicial depende da propriedade índice ou característica ao sair do processo de fabricação (ponto no eixo Y que corresponde a propriedade inicial de 100%). A margem de segurança (item 5), intervalo entre a vida de serviço requerida de projeto (item 10) e o tempo para a falha (item 11), ou fim de vida previsto, deve ser

estabelecido em projeto, de modo que uma possível falha seja prevista em tempo superior a vida de serviço. Ou seja, visa garantir o desempenho satisfatório das funções estabelecidas diante das condições de degradação sem atingir o estágio de falha (ISO/TS 13434, 2020).

Figura 2 - Comportamento das propriedades dos geossintéticos por tempo.



Legenda:

- X Tempo
- Y Propriedade de um geossintético, expressa como a porcentagem de seu valor original
- 1 Propriedade disponível
- 2 Margem entre as propriedades disponível e requerida em um tempo intermediário
- 3 Margem de segurança para vida de projeto
- 4 Propriedade requerida
- 5 Margem de segurança entre a vida de projeto e tempo para falha
- 6 Duração antes da instalação (armazenamento e transporte)
- 7 Duração da instalação e cobertura
- 8 Duração da construção adicional
- 9 Tempo intermediário durante o uso normal
- 10 Vida de serviço de projeto
- 11 Tempo para falha

Fonte: ISO/TS 13434, 2020. Adaptada pela autora

A avaliação da durabilidade dos geossintéticos tem como objetivo fornecer aos projetistas informações necessárias para o adequado dimensionamento destes materiais, de modo a obterem desempenho satisfatório das propriedades dentro da vida de serviço de projeto. Para tal propósito, devem ser sumarizados os seguintes pontos (ISO/TS 13434, 2020; Lopes; Lopes, 2010; Shukla, 2016):

- identificar as aplicações e funções;
- identificar as propriedades requeridas;
- analisar os agentes de degradação (ou fatores ambientais significativos);
- realizar ensaios de durabilidade;
- avaliar os efeitos sinérgicos entre os diferentes agentes de degradação;
- definir os valores para os fatores de redução parciais (FR_p).

Os resultados de testes de durabilidade de geossintéticos, listados em normas (ASTM D 5819, 2022; ISO/TS 13434, 2020) ou realizados sob prescrições que mais se assemelham às condições de uso, são normalmente ponderados por propriedades macroestruturais, por exemplo, propriedades mecânicas por resistência à tração máxima retida, e menor uso de testes microestruturais. É a partir de parâmetros macro que são obtidos fatores de redução parciais para o dimensionamento das propriedades de projeto (Shukla, 2016).

Define-se Fator de Redução Parcial (FR_p) a relação entre a propriedade índice (valor nominal ou característico) dos geossintéticos pela sua propriedade retida (após solicitações de uso). Aplicam-se em projeto o Fator de Redução Total (FR_T) que corresponde a composição de FR_p em função das condições de projetos (Equação 1). FR_p visam deduzir da propriedade índice (por exemplo, resistência à tração máxima característica) as solicitações em que os geossintéticos estarão submetidos para cada aplicação em particular. Estes podem ser obtidos a partir de ensaios laboratoriais específicos ou de campo, ou estimados a partir de experiências preliminares do comportamento do material (Recomendação IGSSBrasil 003, 2014), sejam disponíveis pelo fabricante ou registros históricos de exumações.

$$Propriedade\ disponível = \frac{Propriedade\ índice}{FR_T} \quad (1)$$

Dado que,

FR_T : fator de redução total (Equação 2)

$$FR_T = FR_{p_1} \times FR_{p_2} \times FR_{p_3} \times fs \quad (2)$$

Dado que,

FR_{p_1} = fator de redução parcial 1;

FR_{p_2} = fator de redução parcial 2;

FR_{p_3} = fator de redução parcial 3;

fs = fator de incertezas.

O fator de incertezas (f_s) considera a variação estatística dos fatores de redução calculados para tomadas de decisões, particularmente em aplicações de longo prazo. Este é um importante valor a ser estabelecido nos dimensionamentos, cuja análise considera os aspectos índices dos materiais e o seu método de obtenção, a influência de fatores que induzem a redução de tais propriedades ao longo do tempo, bem como de critérios de dimensionamentos (ABNT NBR 16920-1, 2021; ISO/TR 20432, 2022³).

A magnitude do f_s é dependente das implicações de falhas do geossintético e, assim, específica das condições de uso (Shukla, 2016). Em vista disso, deve-se compreender quais são os fatores condicionantes do uso de materiais geossintéticos e de que modo irão influenciar na manutenibilidade de suas propriedades durante a vida de serviço de projeto.

A partir das principais causas de degradação, define-se a propriedade disponível, por exemplo, a resistência à tração de projeto (resistência admissível) pela aplicação de fatores de redução parciais (ISO/TR 20432, 2022), conforme Equação 3.

$$T_P = \frac{T_{indice}}{FR_{FL} \times FR_{DI} \times FR_{IN} \times FR_{AQ} \times f_s} \quad (3)$$

Dado que,

T_P = resistência à tração de projeto (admissível) para o estado de limite último;

T_{indice} = resistência à tração índice (ou característica) do geossintético;

FR_{FL} = fator de redução por fluência;

FR_{DI} = fator de redução por danos de instalação;

FR_{IN} = fator de redução por intemperismo durante a exposição antes da instalação ou para exposição permanente;

FR_{AQ} = fator de redução por ataque químico e ambiental na temperatura de projeto;

f_s = fator de incertezas.

³ As normas destinadas ao dimensionamento de estruturas de solos reforçados com geossintéticos (ABNT NBR 16920-1, 2021; ISO/TR 20432, 2022) reportam os critérios de dimensionamento de T_P , bem como destacam a avaliação de deformação máxima do reforço durante a vida de serviço de projeto e a respectiva resistência mínima que pode ocasionar à ruptura no estado de limite último. Estes dependem diretamente do tempo e do ambiente de exposição do sistema de reforço.

Como destacado na norma ISO/TR 20432 (2022), para projetos com vida útil longos (normalmente de 50 a 100 anos), os fatores de redução parciais devem ser determinados a partir da extrapolação de resultados de curto prazos em conjunto, se aplicável, a ensaios acelerados de fluência ou degradação em temperaturas elevadas.

2.2 APLICABILIDADE DE GEOTÊXTEIS SOB FLUÊNCIA À TRAÇÃO E INTEMPERISMO

Dentre as inúmeras aplicações de geotêxteis na engenharia geotécnica e civil, tem-se o uso em obras costeiras, emergenciais ou não, por diques estruturados em bolsas ou tubos de geotêxteis preenchidos com material granular (areia). Ademais, aplicações hidráulicas e ambientais para o desaguamento e confinamento de resíduos, originados em inúmeros processos industriais, em estruturas denominadas de tubos geotêxteis (Lawson, 2008), ou sistemas de confinamento de resíduos, SCR (Recomendação IGSBrasil 004, 2016).

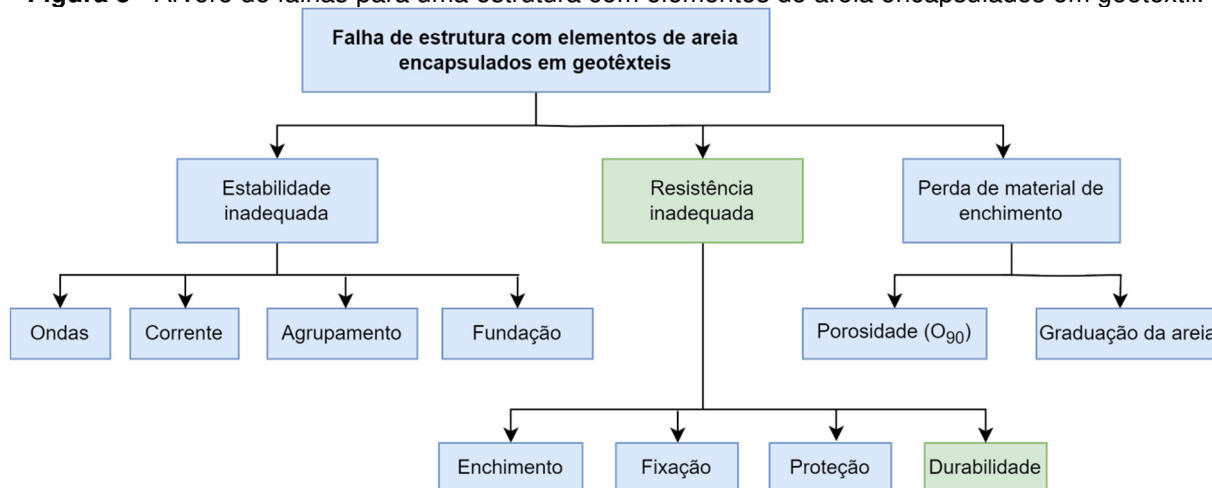
Bezuijen e Vasternburg (2013) apresentam diretrizes de estruturas de geotêxteis por encapsulamento de areia para projetos de engenharia hidráulica e costeira em formatos de sacos, colchões, tubos e containers, cujos autores discorrem sobre a 'árvore de falhas' a partir dos potenciais mecanismos de falhas, como exemplificado na Figura 3. Além disso, a bibliografia reporta acerca de análises para o dimensionamento de tais estruturas (Bezuijen; Vasternburg, 2013):

- duração das tensões (por exemplo, fluência à tração) ao longo da vida de serviço de projeto;
- formato da construção da estrutura preenchida com areia;
- duração da exposição ao intemperismo;
- taxa de lixiviação de antioxidantes e estabilizantes UV;
- presença de íons metálicos que possam catalisar mecanismos de degradação;
- agressividade do ambiente (por exemplo, acidez ou alcalinidade).

Apesar de não tratar-se diretamente de projetos para tubos geotêxteis, tais inferências também podem ser estendidas ao referido uso (Lawson, 2008), uma vez que os principais fatores de degradação nesta aplicação incluem a dinâmica climática (principalmente a radiação ultravioleta, os ciclos térmicos e as precipitações por períodos parcial ou totalmente expostos), degradação química e efeitos por danos de instalação e mecânico, como tensões cíclicas e deformações por fluência à tração não confinada durante processos de enchimento, desaguamento e solidificação dos

estágios de material bombeado, dentre outros (Carneiro; Moraes; Lopes, 2018; Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012; Hornsey *et al.*, 2011; Hsieh; Wang; Chiu, 2006; Leshchinsky *et al.*, 1996; Sarsby, 2007; Shukla; Yin, 2006; Yee; Choi, 2008).

Figura 3 - Árvore de falhas para uma estrutura com elementos de areia encapsulados em geotêxtil.



Fonte: Bezuijen; Vasternburg, 2013. Adaptada pela autora.

O material geotêxtil e seus componentes, por exemplo as costuras (Figura 4), devem apresentar resistência à tração adequada para resistir às cargas geradas durante os processos de bombeamento e ao longo da vida de projeto em seu preenchimento completo (Lawson, 2008; Leshchinsky; Leshchinsky, 2002).

Figura 4 - Vazamento em SCR por falhas na costura do geotêxtil.



Fonte: Leshchinsky; Leshchinsky, 2002.

Os impactos negativos advindos de vazamentos dos materiais confinados são desde entupimentos nos leitos de drenagem destinados ao líquido desaguado, contaminações ambientais, sejam por deposição de partículas sólidas ou em

suspensão e possíveis presenças de elementos químicos e biológicos contaminantes, mortalidades em desastres ambientais de maiores proporções (Kiffle; Bhatia; Lebster, 2023). Isto evidencia a relevância de se compreender a durabilidade de geotêxteis nestas aplicações e seu adequado dimensionamento e seleção, como pela ação de intemperismo sob fluência, objetos de investigação deste trabalho. Tais impactos também se estendem a práticas de disposição inadequada de resíduos gerados rotineiramente em inúmeros processos industriais sem adequado tratamento e disposição final no meio ambiente.

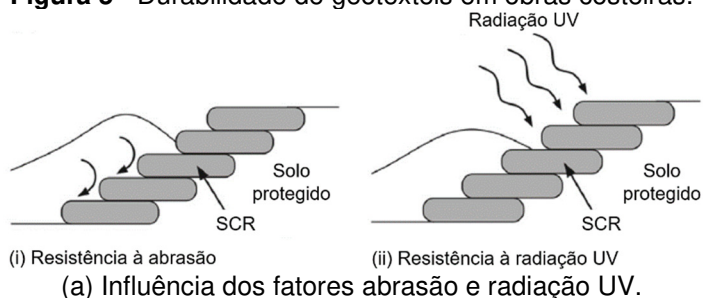
Lawson (2016) remete a importância da análise da durabilidade do material geotêxtil nas obras costeiras, se tais estruturas forem empregadas para vida de projeto de longo prazo e, principalmente, em situação exposta às intempéries e desgastes à abrasão (Figura 5a).

Exemplifica-se também a ocorrência de degradação por radiação UV, desgaste superficial e vandalismo do geotêxtil tecido empregado em obra costeira em situação de exposição (Figura 5b). Esta preocupação também é reportada em estruturas reforçadas com geossintéticos revestidas com geotêxteis (Figura 5c), assim como nas aplicações de SCR (Assinder *et al.*, 2016). O parâmetro de resistência ao intemperismo deve ser ponderado por ensaios de durabilidade para a especificação do tempo máximo de exposição durante a instalação (ISO/TS 13434, 2020; ISO/TS 20432, 2022).

A Figura 5d trata da degradação de um geotêxtil empregado em uma obra de infraestrutura portuária na Austrália. A referida obra compôs uma contenção de entulhos dragados durante a estruturação de canais de navegação portuária, pela sua expansão local. A relevância deste relato deu-se pelos autores reportarem que a principal causa da falha foi o uso inadequado do geotêxtil, em termos de especificações de projeto e instalação, que não abordou adequadamente as solicitações mecânicas que o geotêxtil seria submetido, cuja ocorrência causou a contaminação marinha adjacente por perdas de finos em ambiente com presença de recifes de corais. A degradação ocorreu por desgastes à abrasão, reversões de fluxos de maré, exposição à radiação UV durante 10 meses, bem como danos ocorridos na instalação (Hornsey; Service, 2017⁴).

⁴ Os autores reportaram sobre a importância na divulgação desta falha e dos fatores que contribuíram para a sua ocorrência aos engenheiros, de modo a evitar problemas com projetos semelhantes no futuro (Hornsey; Service, 2017).

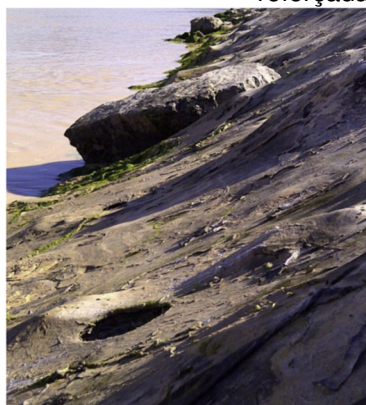
Figura 5 - Durabilidade de geotêxteis em obras costeiras.



(b) Degradação de geotêxtil polipropileno exposto em obras costeiras no México.



(c) Degradação de geotêxtil de polipropileno empregado como revestimento em estrutura íngreme reforçada na Indonésia.



(d) Degradação de geotêxtil em obra de infraestrutura portuária na Austrália.

Fonte: (a) Lawson, 2012. Adaptada pela autora; (b) Díaz Júnior *et al.*, 2018; (c) Dobie, 2016; (d) Hornsey; Service, 2017.

Neste âmbito, o dimensionamento de geotêxteis é baseado em critérios de estimativa da resistência à tração, em detrimento de solicitações que podem ocasionar perdas nesta propriedade, e de filtração. Para o dimensionamento em termos de

resistência, tem-se as recomendações da literatura para a composição de FR_T , adicionado à concepção do f_s para compensar as incertezas nos dimensionamentos (Bezuijen; Vasternburg, 2013; ISO/TR 20432, 2022), listadas a seguir:

- FRp_{DI} = fator de redução parcial devido a **danos de instalação**. De acordo com Leshchinsky *et al.* (1996), recomenda-se valor mínimo de 1,3 que pode estar associado a um aumento accidental da pressão de bombeamento. Shukla (2016) trata a importância dos danos de instalação frente à durabilidade dos geossintéticos, com ênfase a aplicações mecânicas de reforço, assim como o termo “sobrevivência da construção” para a etapa de instalação, que pode ser avaliado por meio de ensaios laboratoriais ou de campo, bem como de experiências anteriores;

- FRp_{FL} = fator de redução parcial devido a **solicitação por fluência**. Este fator de redução depende de distintas condições de carregamento e, também, do tipo de matriz polimérica, com a recomendação, no geral, de valor mínimo igual a 1,5 (Leshchinsky *et al.*, 1996);

- FRp_{AQ} = fator de redução parcial devido a **degradação química**. Atenta-se que, neste caso, considera-se a degradação por componentes químicos presentes nos fluidos a serem confinados e, também, os efeitos da degradação por incidência de radiação ultravioleta. De acordo com Leshchinsky *et al.* (1996), caso o fluido seja considerado quimicamente inerte e se o geotêxtil permanecer em exposição até o tempo máximo permitido para a sua instalação, adota-se valor mínimo igual a 1,0;

- FRp_{DB} = fator de redução parcial devido a **degradação biológica**. Em aplicações de SCR, no geral este tipo de degradação não é significativa. Neste caso, a sua inclusão será feita apenas se necessário (Leshchinsky *et al.*, 1996);

- FRp_{EM} = fator de redução parcial devido a **resistência nas emendas ou costuras**. É recomendado valor mínimo inicial igual a 2,0 (Leshchinsky *et al.*, 1996) ou 2,5 (Vertematti, 2015), até a realização de ensaios de resistência de emendas pela norma ABNT NBR ISO 10321 (2013). Neste parâmetro, estudos prévios são realizados para a escolha do tipo de emenda que atenda às condições de enchimento e confinamento, com o impedimento de rompimento pela costura e, portanto, o vazamento do conteúdo confinado (Guo; Chu; Zhou, 2015; Lawson, 2008; Leshchinsky; Leshchinsky, 2002);

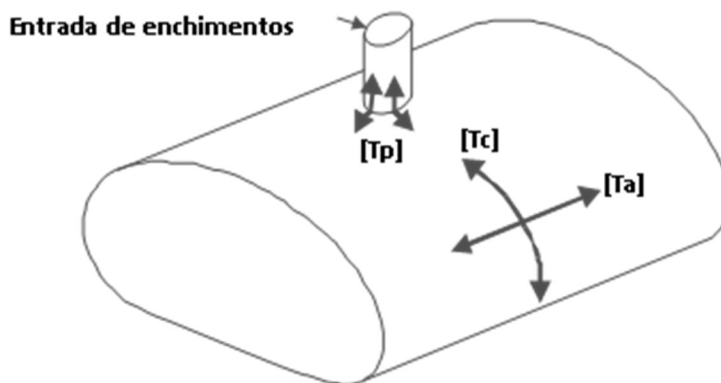
- f_s = Bezuijen e Vasternburg (2013) mencionam **fator de incertezas (ou fator de segurança)** entre 1,1 e 1,5 (encapsulamento de areia), com destaque de 1,1 a 1,2

para bolsas/sacos, colchões e tubos de geotêxteis. Na ausência de análises dos distintos fatores intervenientes, Lawson (2008) aborda a aplicação deste fator entre 4,0 e 5,0.

FR_T obtidos pela aplicação cautelosa dos fatores de redução parciais normalmente encontram-se no intervalo de 3,5 a 4,0 para geotêxteis com encapsulamento de areia (Bezuijen; Vasternburg, 2013), cujo valor é aproximado ao intervalo de 4,0 a 5,0 supracitado (Lawson, 2008).

Referente a tensões induzidas aos tubos geotêxteis nas aplicações reportadas, Leshchinsky *et al.* (1996) discorrem que a resistência à tração necessária do geotêxtil é estimada pela teoria da membrana linear, que depende da circunferência, altura máxima de enchimento e pressão máxima de bombeamento dos resíduos. Estas são concentradas em três pontos e aliviadas ao longo do desaguoamento até o próximo ciclo de bombeamento (Figura 6): (a) ao longo da circunferência ou tensão circunferencial $[T_c]$; (b) ao longo do seu comprimento ou tensão axial $[T_a]$; (c) tensões geradas nos pontos de enchimento do sistema ou tensão de entrada $[T_p]$. As tensões supraindicadas geram solicitações por fadiga cíclica ao longo do processo e fluência à tração na consolidação final dos SCR.

Figura 6 - Tipos de tensões geradas em sistemas de confinamento com geotêxteis.



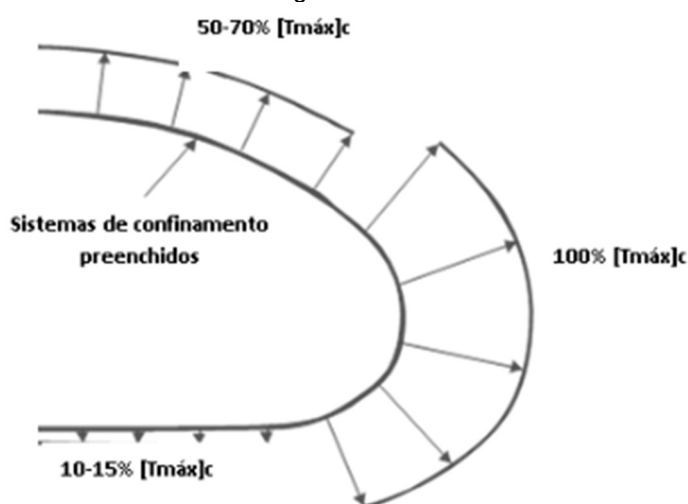
Fonte: Lawson, 2008. Adaptada pela autora.

A mensuração da magnitude de tais tensões é uma análise complexa por envolver diversos fatores isolados e conjuntamente, como a geometria do sistema de confinamento, a pressão de enchimento e o tempo de bombeamento, a natureza (ou tipo de granulometria) do material de enchimento e seu estado físico (líquido, semissólido ou sólido) ao longo do tempo, dentre outros (Lawson, 2008).

As solicitações por tensões circunferenciais $[T_c]$ tendem a apresentar maiores magnitudes durante o bombeamento devido a própria geometria do sistema de

confinamento e são regidas pela curvatura e espessura do geotêxtil. Valores máximos de $[T_c]$ localizam-se no ponto de curvatura mais alta do sistema, que são nas laterais do sistema preenchido (até 100%). Menores magnitudes de $[T_c]$ estão na base dos tubos geotêxteis devido a sua configuração mais plana (10-15%). Quanto as tensões axiais $[T_a]$, estas são governadas pela pressão de enchimento e altura atingida pelo tubo. As tensões de entrada $[T_p]$ são, também, em função da pressão de bombeamento, da altura atingida pelo tubo geotêxtil e formato do bocal de enchimento (Lawson, 2008). Lawson (2008), ao correlacionar dados apresentados por Palmerton (2002), reportou a tensão máxima axial $[T_{máx}]_a$ estimada como 63% da tensão máxima circunferencial $[T_{máx}]_c$, indicados na Figura 7.

Figura 7 - Magnitudes de tensões circunferenciais máximas $[T_{máx}]$ comumente observadas em tubos geotêxteis.



Fonte: Lawson, 2008. Adaptada pela autora.

A literatura relata que os tubos geotêxteis são dimensionados para receberem mais de um ciclo de bombeamento de resíduos até atingir a consolidação final. Aguarda-se o desaguamento pela redução do teor de líquidos e concentração de sólidos entre os bombeamentos realizados até alcançar a fase de consolidação. O número de ciclos de bombeamento depende de diferentes parâmetros, como a capacidade volumétrica dos tubos, a resistência à tração do geotêxtil e a eficiência das emendas, definidas em projeto (Lawson, 2008; Leshchinsky *et al.*, 1996).

As tensões geradas nos tubos geotêxteis devem ser suportadas e dimensionadas pelas suas propriedades mecânicas, principalmente a resistência à tração, com a adoção de fatores de reduções parciais aplicáveis, conforme Equação 3. Estas solicitações crescem exponencialmente com o aumento da altura de enchimento, o qual requer otimizações em tais critérios de dimensionamento para projetos seguros

e estáveis (Assinder *et al.*, 2016). Também, esta propriedade mecânica é comumente avaliada em demais estudos de durabilidade de geossintéticos (Carneiro; Moraes; Lopes, 2018).

Vale ressaltar que as solicitações mecânicas também impactam em parâmetros hidráulicos de geotêxteis, que podem comprometer a capacidade de retenção das partículas sólidas (Cooke; Rebenfeld, 1988; Fourie; Kuchena, 1995) e, até mesmo, o seu rompimento em conjunto a degradação por intemperismo.

Por exemplo, Fourie e Addis (1999) verificaram aumentos na abertura de filtração em geotêxtil tecido de polipropileno de menor espessura submetido a carga de tração biaxial em torno de 11% da resistência à tração mínima do material. Contudo, o oposto foi verificado para geotêxtil tecido de polipropileno de maior espessura, cujos autores atribuíram este comportamento, à época, a possível influência na natureza dos filamentos tecidos, que podem se achatar sob carregamentos e, assim, ocasionar redução na abertura de filtração.

Wu, Hong e Wang (2008) observaram que ao submeter geotêxteis tecidos e não-tecidos a três níveis de deformações uniaxiais (5%, 10% e 20%) ocorreram aumentos em tamanhos de aberturas de filtração e em taxas de fluxos, com maiores efeitos em geotêxtil não-tecido. Além disso, Palmeira, Melo e Moraes-Filho (2019) também observaram variações no tamanho da abertura de filtração em geotêxteis não-tecidos sob tensões não confinadas. Apesar da evidente influência sumarizada, a referida abordagem não é escopo deste trabalho. Para ensaios de parâmetros hidráulicos, são necessárias amostras de maiores dimensões.

Como o propósito de estudo deste trabalho é direcionado aos fatores de degradação por fluência à tração e intemperismo e os seus efeitos combinados por sinergismo, no Apêndice A exemplificam-se algumas aplicações de geotêxteis em que tais fatores encontram-se presentes, como em obras costeiras e desaguamento e confinamento de resíduos de distintas origens e sedimentos contaminados.

2.3 DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS POR INTEMPÉRIES

2.3.1 Efeitos nocivos da radiação ultravioleta

Existe um consenso na literatura que os efeitos das intempéries podem ser associados a absorção de energia solar pelos geossintéticos, com agravante pela radiação ultravioleta (UV), temperatura do ambiente, presença de umidade, efeitos de choques térmicos ocasionados por precipitações, dentre outras dinâmica climática

próprias do local de exposição (Greenwood; Shroeder; Voskamp, 2012; ISO/TS 13434, 2020; Koerner; Hsuan; Koerner, 1998; Lopes; Lopes, 2010).

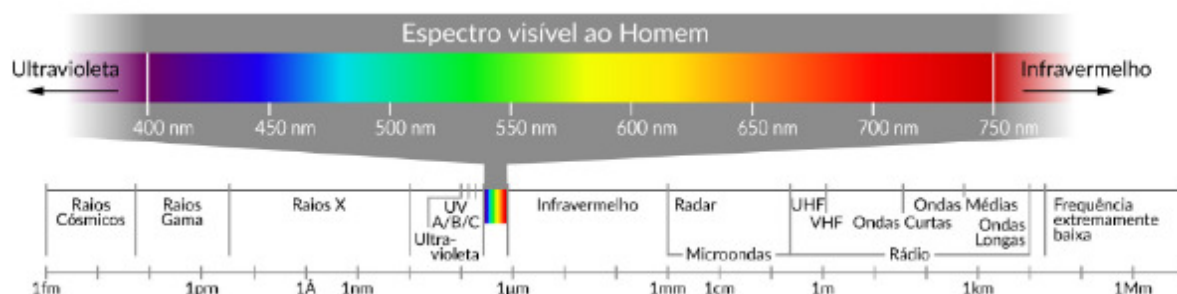
A componente da radiação ultravioleta (UV) é a porção energética mais alta do espectro solar, subdividida em três parcelas (UVA, UVB e UVC), cuja parcela do UVC não atinge a superfície terrestre por ser absorvida pela camada de ozônio (Koerner, 2012; Sarsby, 2007). As demais parcelas incidentes também podem ser atenuadas por demais constituintes atmosféricos, tais como partículas, névoas, nuvens, dentre outros (Escobedo *et al.*, 2011). A Tabela 3 apresenta as parcelas da radiação ultravioleta e na Figura 8 a distribuição da radiação solar global com a indicação da radiação supracitada.

Tabela 3 - Comprimento de onda e energia na faixa do ultravioleta.

Região Ultravioleta	Comprimento de onda (nm)	Energia do fóton (kJ/mol)
UVA (400 a 315 nm)	400	299
	350	342
UVB (315 a 280 nm)	300	399
UVC (280 a 100 nm)	250	478
	200	598

Fonte: De Paoli, 2008. Adaptada pela autora.

Figura 8 - Distribuição da radiação solar com os respectivos comprimentos de ondas.



Fonte: Pereira *et al.*, 2017.

A radiação UV é um tipo de radiação eletromagnética que apresenta uma quantidade de energia em função de sua frequência, dada pela Lei de Planck (Equação 4).

$$E = h\nu \quad (4)$$

Dado que,

E = energia da radiação (ou energia de um fóton);

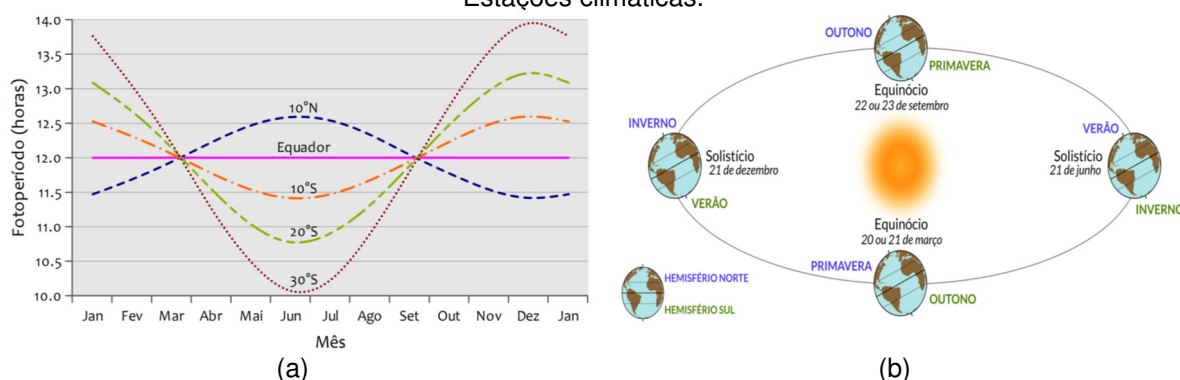
ν = frequência da radiação;

h = constante de Planck.

A incidência da radiação UV, bem como das demais parcelas do espectro solar, é governada por diversos fatores ambientais, tais como temperatura ambiente e amplitudes térmicas diárias, temperatura absorvida pelos materiais, temperatura do solo adjacente aos materiais em exposição, poluentes atmosféricos, chuva, umidade relativa do ar, dentre outros (ASTM D 5819, 2022).

Além disso, há influência significativa da latitude local ao longo do ano, bem como das estações climáticas (Figura 9), cuja taxa emitida pelo Sol é aproximadamente constante em torno de $3,86 \times 10^{26}$ W e com irradiância solar anual entre 1.325 W/m^2 e 1.412 W/m^2 . Este último depende diretamente do Solstício (período em que o Sol atinge a máxima declinação em relação ao Equador) e do Equinócio (período em que o Sol cruza com o Equador ao longo da órbita) reportados (Pereira *et al.*, 2017).

Figura 9 - Incidência de radiação solar global ao longo do ano em função de: (a) Latitude do local; (b) Estações climáticas.



Fonte: Pereira *et al.*, 2017.

A intensidade da radiação emitida é também governada pela variação da temperatura. Neste caso, o acréscimo de temperatura ocasiona em aumento da emissão de radiação eletromagnética e, em consequência, o aumento da intensidade da radiação, denominada de irradiância (W/m^2) (Wypych, 2008). Acréscimos de temperatura também atuam em processos catalíticos de degradação, como a fotodegradação. Esta consiste em rupturas de ligações químicas covalentes nos polímeros, na cadeia principal ou lateral, por reações oxidativas e autocatalíticas, o qual originam espécies altamente reativas denominadas de radicais livres (De Paoli, 2008; Greenwood; Shroeder; Voskamp, 2012; ISO/TS 13434, 2020; Koerner; Hsuan; Koerner, 2017; Suits; Hsuan, 2003).

As rupturas de ligações químicas ocorrem pela energia da radiação UV ser superior a energia das ligações químicas nas cadeias poliméricas (Tabela 4). As maiores energias da radiação UV decorrem destas apresentarem comprimentos de

ondas menores, espectro abaixo de 400 nm, que induz ao aumento da intensidade dos fótons emitidos (Allen, 2016; Kockott, 1989).

Tabela 4 - Energias de ligações químicas em polímeros.

Ligação	Energia (kJ/mol)
C-C	347
C-Cl	340
C-F	486
C-H (carbono primário)	425
C-H (carbono secundário)	411
C-H (carbono terciário)	404
C-O	358
O-CO	460
C=O (cetona)	745

Fonte: De Paoli, 2008. Adaptada pela autora.

A faixa da radiação solar acima de 800 nm (infravermelho) contribui para o aquecimento dos materiais expostos sem ocorrência de reações fotoquímicas. A radiação do espectro visível (entre 400 nm a 800 nm) também agrega para o aquecimento dos materiais e, assim, iniciar degradações fotoquímicas, por exemplo, em materiais poliméricos e corantes mais fotossensíveis (De Paoli, 2008).

As reações foto-oxidativas ocorrem preferencialmente nas regiões amorfas dos polímeros devido à baixa permeabilidade ao oxigênio na fase cristalina. Todavia, isso não evita que as regiões cristalinas dos polímeros também sofram efeitos da exposição à radiação ultravioleta (Rabello; White, 1997).

Os mecanismos de fotodegradação são distintos em função da matriz polimérica. No caso das poliolefinas, que podem corresponder a 95% (polipropileno) e 2% (polietileno) na fabricação de geotêxteis, este processo de degradação se inicia pela geração de radicais livres. Em poliéster (PET), ocorre a quebra molecular com geração de grupos carbonilas (C=O) e consequente perda de resistência. Para o policloreto de vinila (PVC), ocorrem reações de quebras complexas, com a liberação da parcela (-HCl) clorada (Allen, 2016; ISO/TS 13434, 2020; Koerner, 2012). Conforme indicado na Figura 10, certos comprimentos de onda (UV-A, UV-B e UV-C) são mais nocivos a determinadas matrizes poliméricas.

De modo geral, reações autocatalíticas ocorrem como inicialização do processo, exemplificado pela energia fornecida por radiação ultravioleta (UV) e oxigênio (O₂) do meio, os quais induzem a geração de radicais livres. A propagação é uma etapa complexa em que podem ocorrer distintas combinações entre os radicais livres gerados no processo autocatalítico e que também induzem cisões em outras ligações químicas intactas. A partir de então, ocorrem sucessivas reações em cadeia que

apenas cessam se novas combinações entre os radicais livres der origem a compostos químicos não reativos (Li *et al.*, 2018; Wypych, 2008; Zweifel; Maier; Schiller, 2009).

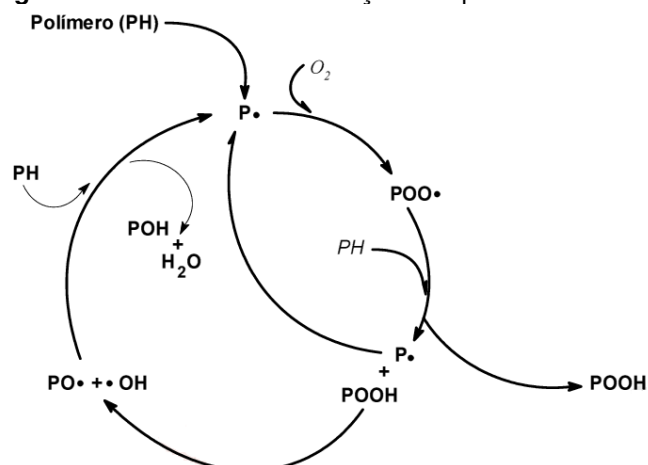
Figura 10 - Radiação solar e alguns comprimentos de onda da radiação ultravioleta nocivos a materiais poliméricos.



Fonte: Sarsby, 2007. Adaptada pela autora.

A título de exemplificação, a Figura 11 apresenta um esquema do ciclo autocatalítico das poliolefinas, em que PH é a cadeia polimérica intacta e P• são radicais autocatalíticos. Verifica-se a geração de elementos POOH, denominados de hidroperóxidos e que apresentam como característica básica a presença de grupos carbonilas, grupo funcional formado por um átomo de carbono com ligação dupla a um átomo de oxigênio (C=O). A presença de tais grupos carbonilas em um material polimérico degradado pode ser utilizada como um indicador de degradação fotoquímica (De Paoli, 2008; Maxwell *et al.*, 2005).

Uma técnica analítica que pode ser utilizada para a verificação destes grupos carbonilas é a Espectroscopia de Infravermelho (em inglês, IR – *Infrared region*), ensaio que detecta a presença de grupos funcionais em um material a partir da frequência de absorção da radiação infravermelho por tais grupos (Cienfuegos; Vaitsman, 2000). Alguns estudos empregaram a espectroscopia de infravermelho para verificar a formação de grupos carbonilas em geotêxteis não tecidos de polipropileno submetidos a ensaios de intemperismo acelerado (por exemplo, Carneiro, 2009; Dias Filho; Maia; Xavier, 2019a; Valente *et al.*, 2010).

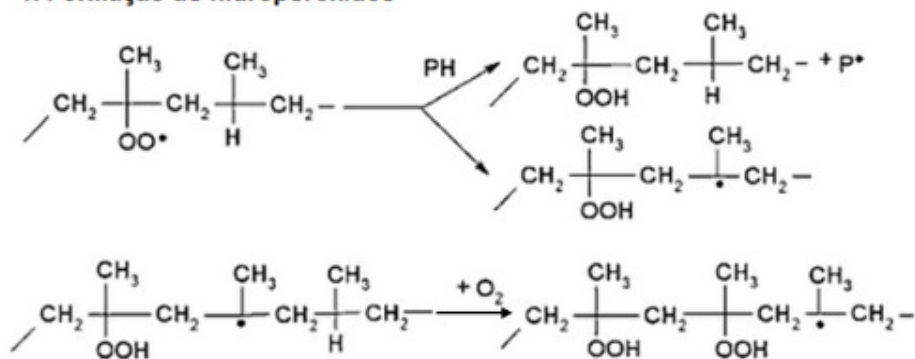
Figura 11 - Ciclo de auto-oxidação das poliolefinas.

Fonte: De Paoli, 2008.

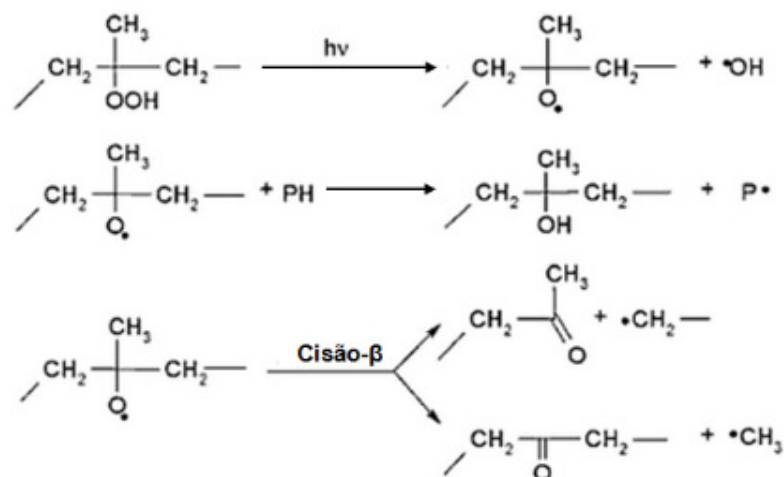
Como este trabalho engloba estudos de degradação que envolve intemperismo de campo em geotêxtil tecido de polipropileno (PP), apresenta-se uma descrição sucinta de mecanimos de fotodegradação para este polímero (Figura 12).

Figura 12 - Mecanismo de foto-oxidação de polipropileno.

1. Formação de hidroperóxidos



2. Fotólise de hidroperóxidos



Fonte: Zweifel; Maier; Schiller, 2009. Adaptada pela autora.

O polipropileno é suscetível a degradações oxidativas devido à presença do carbono terciário nas ramificações da cadeia polimérica, caracterizado por um átomo de carbono ligado a outros três átomos de carbono. O carbono terciário requer uma menor energia na dissociação da ligação carbono-hidrogênio para formação de radicais livres em comparação aos carbonos primários e secundários. Como consequência de cisões poliméricas, ocorre a diminuição do peso molecular e subsequente diminuição nas propriedades mecânicas (Cooke; Rebenfeld, 1988; De Paoli, 2008; Hsuan *et al.*, 2008; Li; Hsuan, 2004; Maier; Calafut, 1998).

Durante a fotodegradação do polipropileno, há formação de hidroperóxidos (POOH) que sofrem fotólise e originam radicais hidroxilas e radicais macro-alcóis. Estes últimos extraem um átomo de hidrogênio do polipropileno ou ainda sofrem reações de decomposição o qual resultam na cisão da cadeia polimérica. A cisão- β tem sido considerada como a reação principal da degradação do polipropileno, com a cisão ou não da cadeia polimérica (Zweifel; Maier; Schiller, 2009).

2.3.2 Incidência estimada de radiação UV no Brasil

Para inferir sobre a incidência de radiação UV durante ensaios de intemperismo de campo (apresentado no item 2.3.3), normalmente faz-se uma relação com a radiação solar global (G). A adoção de estimativas de radiação UV incidentes são realizados devido a disponibilidade de dados de radiação G pela maioria das estações meteorológicas convencionais, visto que equipamentos que realizam medições de radiação UV, inclusive no Brasil, não são comuns devidos aos custos dos equipamentos apropriados a esta finalidade.

Algumas pesquisas pontuais no Brasil têm realizado medidas de incidência UV que visam, por exemplo, monitoramentos da camada de ozônio (Bertagnolli *et al.*, 2007; Coariti *et al.*, 2018), bem como efeitos epidemiológicos de cânceres de pele (Corrêa, 2015; Franco *et al.*, 2016; Schalka *et al.*, 2014), que são tratadas como índice ultravioleta (UVI), padrão da Organização Mundial de Saúde (OMS) para classificar o valor máximo diário de incidência por radiação UV. O UVI é convertido em categorias que se referem a efeitos na pele humana em escala de UVI 0, baixo risco de exposição, para UVI 11+, como risco extremo. A unidade UVI significa $0,025\text{W/m}^2$ de irradiância energética (Corrêa, 2015).

Publicações em geossintéticos abordam que a relação entre a radiação UV incidente e a radiação G está (UV/G) entre 6% e 9% (EN 13362, 2018), estabelecido

a partir de dados do Sul da Europa para análises de resultados por intemperismos de campo e acelerado, este último de acordo com a norma EN 12224 (2000) e baseada em recomendações da ISO/TS 13434 (2020). Ademais, Greenwood, Shroeder e Voskamp (2012) estimam radiação UV/G na faixa de 5 a 10%, com maiores relações em locais de altitudes elevadas e próximos aos polos. Nestes casos, remetem a uma razão UV/G média estimada de 7,5%.

Pesquisadores brasileiros publicaram resultados a partir de leituras obtidas e validadas por modelos matemáticos e estatísticos, assim como modelagens computacionais, para se estimar a razão entre as radiações UV e G (Escobedo *et al.*, 2011; Escobedo *et al.*, 2014; Leal; Tíba; Piacentini, 2011). A Estação de Radiometria Solar na Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, Campus Botucatu (Unesp Botucatu), latitude de 22°54'S, longitude de 48°27'W e altitude de 786 m, em operação desde 2001 (Figura 13) realiza simultaneamente medições do espectro de radiação solar global (G) e as parcelas da radiação ultravioleta (UV) e de infravermelho (NIR), considerada pioneira no Brasil para tais monitoramentos (Escobedo *et al.*, 2011).

Figura 13 - Estação de Radiometria Solar da UNESP, Campus Botucatu, SP.



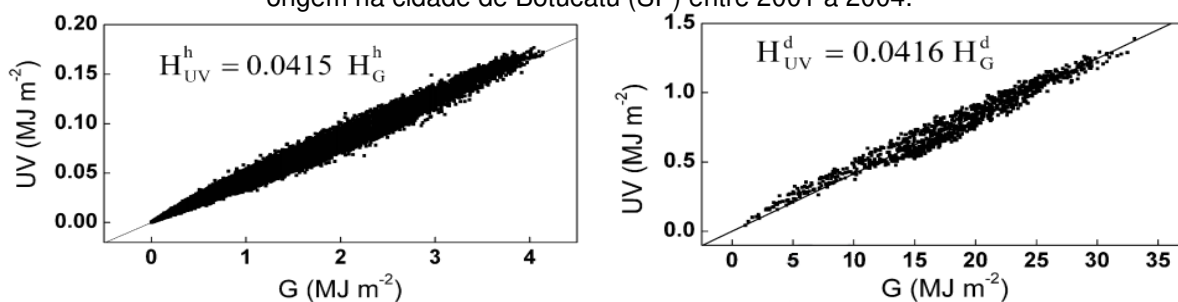
Fonte: Escobedo *et al.*, 2011. Adaptada pela autora.

Escobedo *et al.* (2011) e Escobedo *et al.* (2014) apresentaram dados radiométricos coletados entre 2001 e 2004 na estação apresentada na Figura 13, o

quais foram validados para o estabelecimento de correlações entre as frações espectrais UV e NIR da radiação G e, também, modelados por regressões lineares a partir da origem, de modo a estimar os fluxos radiantes para o ambiente brasileiro. Na referida pesquisa, os pesquisadores obtiveram frações médias de UV/G horária de 4,31% e diária de 4,17%.

As modelagens por regressão linear (Figura 14) alcançaram inclinações de 0,0415 (medida horária) e 0,0416 (medida diária), bem como coeficientes de determinação (R^2) para medidas horária de 0,9794 e diária de 0,9204. Portanto, a razão UV/G correspondeu a um percentual estimado médio de 4,2%. Os autores justificam que as dispersões presentes nos gráficos de correção UV/G podem ser justificadas devido as diferenças nos tempos de resposta entre os sensores de G e UV, bem como a variações sazonais ocasionadas pela umidade e carga de aerossol na atmosfera local de medição (Escobedo *et al.*, 2011; Escobedo *et al.*, 2014).

Figura 14 - Correlação linear entre medidas de radiação solar global e radiação ultravioleta a partir da origem na cidade de Botucatu (SP) entre 2001 a 2004.



(a) Radiações integradas em 1 hora [H_{uv}^h].

(b) Radiações integradas diária [H_{uv}^d].

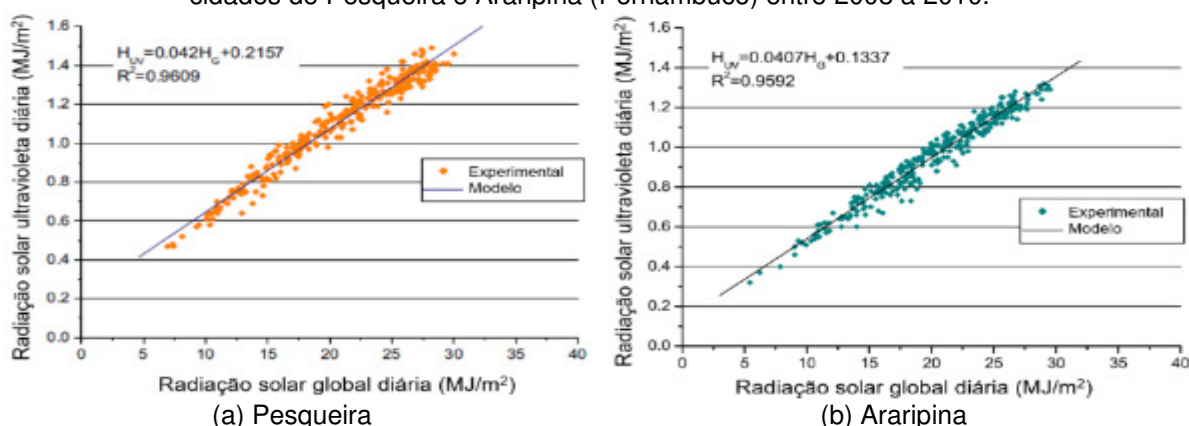
Fonte: Escobedo *et al.*, 2011.

Leal, Tíba e Piacentini (2011) realizaram estudos de modelagens estatísticas e computacionais por redes neurais artificiais a partir de medidas de radiações UV e G, bem como demais variáveis comumente obtidas em estações meteorológicas convencionais, com o intuito de também estimar a relação UV/G. Tais modelagens foram feitas por dados coletados em duas cidades de Pernambuco (Pesqueira e Araripina) entre 2008 e 2010. A Figura 15 apresenta correlações lineares entre as radiações UV e G diárias e os respectivos coeficientes de determinação (R^2), cujas inclinações são similares aos apresentados na Figura 14, com a diferença desta correlação linear não ter sido realizada a partir da origem, conforme pesquisas de Escobedo *et al.* (2011).

Genericamente, o comportamento anual de incidência de radiação UV depende diretamente da dinâmica climática local e das condicionantes atmosféricas, maiores

nos períodos chuvosos (primavera e verão) por concentrações de nuvens e vapor d'água, as quais refletem e difundem grande parte da radiação solar, ao mesmo tempo que o ciclo solar se declina mais próximo da latitude local de análise. Em contrapartida, menores incidências tendem a ocorrer nos períodos secos (outono e inverno), caracterizados por menores taxas de nuvens e vapores d'água em conjunto com o declínio da radiação solar mais afastado do ângulo de latitude (Escobedo *et al.*, 2012; Escobedo *et al.*, 2014).

Figura 15 - Correlação linear entre medidas de radiação solar global e radiação ultravioleta nas cidades de Pesqueira e Araripina (Pernambuco) entre 2008 a 2010.

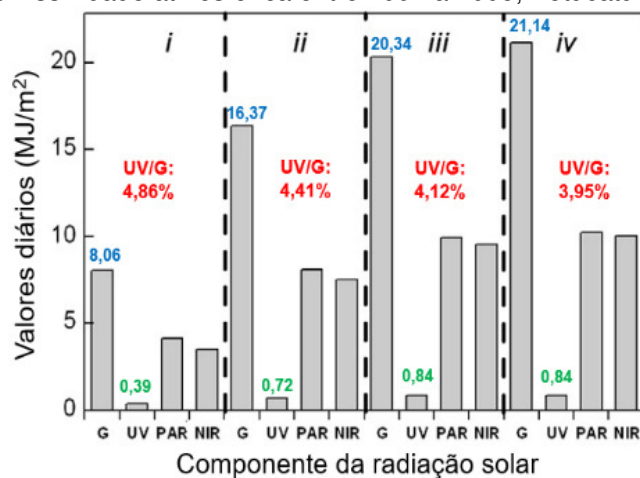


Fonte: Leal; Tíba; Piacentini, 2011. Adaptada pela autora.

A nebulosidade é considerada como uma das principais condicionantes meteorológicas sobre a incidência da radiação solar global na superfície terrestre e, para uma compreensão acerca de sua influência na razão entre UV/G, tem-se o conceito de coeficiente de transmissividade atmosférica (K_T). Define-se como a razão entre as irradiâncias global e atmosféricas que permitem classificar a tipologia de cobertura do céu em relação a sua nebulosidade (Andrade, 2007). Escobedo *et al.* (2009) também ponderaram o coeficiente de transmissividade atmosférica sem considerar as condições de nebulosidade atmosféricas, com a obtenção de relação média entre as radiações UV e G igual a 4,17%, cujo valor é correspondente a 4,2% tratado anteriormente (Escobedo *et al.*, 2011; Escobedo *et al.*, 2014).

De acordo com modelagens estatísticas por Escobedo *et al.* (2009), a partir de dados coletados entre 2001 a 2005 na estação citada na Figura 13, a presença de nuvens acarreta no aumento da relação UV/G uma vez que estas induzem altos índices de vapor d'água na atmosfera, que absorvem mais radiação G e o espectro de energia do infravermelho (NIR), do que a radiação UV. A Figura 16 ilustra este comportamento em relação a quatro intervalos de índices de claridades.

Figura 16 - Valores diários dos componentes da radiação solar em função do coeficiente de transmissividade atmosférica entre 2001 a 2005, Botucatu (SP).



Legenda:

- (i) Céu nublado e componente direto da radiação solar é praticamente zero;
- (ii) Céu parcialmente nublado com predominância de componente difuso da radiação solar;
- (iii) Céu parcialmente nublado com predominância da componente direta da radiação solar;
- (iv) Céu limpo

Fonte: Escobedo *et al.*, 2009. Adaptada pela autora.

Para a presente pesquisa, a estimativa de radiação UV incidente nos intervalos de exposição por intemperismo de campo foi da razão UV/G de 4,2% diária, conforme as pesquisas brasileiras que validaram a razão supramencionada. As similaridades reportadas entre as pesquisas corroboram para a referida escolha (Escobedo *et al.*, 2011; Escobedo *et al.*, 2014; Leal; Tíba; Piacentini, 2011), embora inferior aos valores atualmente adotados em publicações de geossintéticos, que são baseados em recomendações europeias (EN 12224, 2000; EN 13362, 2018, Greenwood; Shroeder; Voskamp, 2012; ISO/TS 13434, 2020).

2.3.3 Ensaios de Durabilidade por Intemperismo de Campo

Ensaios de campo se destinam a avaliar a durabilidade nas condições particulares do local de exposição, ou seja, permitem uma avaliação mais realista do comportamento dos materiais expostos à dinâmica climática de um determinado local. Contudo, são requeridos maiores períodos de exposição para a ponderação de alterações nas propriedades em estudo.

Como a dinâmica climática varia significativamente com o local de exposição, a época do ano e o período do dia, de tal modo que os ensaios de exposição natural se tornam únicos e, em muitos casos, irreprodutíveis (Fechine; Santos; Rabello, 2006). O local e os períodos de exposição (por exemplo, estações climáticas ou demais

intervalos de tempo) podem afetar diretamente o desempenho e o comportamento físico-mecânico de materiais poliméricos, cujo monitoramento é importante para auxiliar na compreensão de resultados obtidos (Carneiro; Lopes, 2017; Leech, 2010).

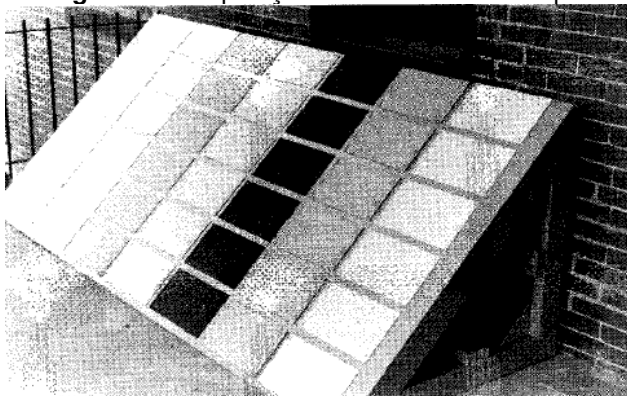
No caso particular de geotêxteis, ensaios de durabilidade em campo podem ser realizados por diretrizes da ASTM D 5970 (2021), que se destina a avaliar a ocorrência de degradação entre produtos geotêxteis para um local em específico. Este ensaio consiste na exposição de geotêxteis em suporte com inclinação de 45° em relação à horizontal, face das amostras direcionadas ao Equador, em tempos de exposição de 1, 2, 4, 8, 12 e 18 meses. Após cada período, avaliam-se as propriedades mecânicas retidas das amostras em comparação às propriedades intactas. A Figura 17 exemplifica alguns ensaios de degradação em campo de geossintéticos.

Há normas que são direcionadas a materiais não metálicos, mas que também podem ser utilizadas para estudo da durabilidade de geossintéticos, tais como: ASTM D 1435 (2020), ASTM D 5272 (2021), ASTM G7/G7M (2021), ISO 877-1 (2009) e ISO 877-2 (2009). Cada uma das referidas normas especifica condições e recomendações de ensaios, como materiais dos suportes, tipo de exposição, ângulo de exposição, utilização de aceleradores de degradação como placas de vidro, condições do local de ensaio e períodos de exposição em campo.

No geral, os materiais a serem utilizados na confecção dos suportes devem ser inertes às condições climáticas e sem tratamento de superfície, como aço inoxidável, ligas de alumínio ou madeira naval. O ângulo de exposição em relação à horizontal é uma das tomadas de decisão mais crítica a ser definido. As normas supracitadas apresentam propostas de 5°, 45°, 90° ou ângulo relativo (ou próximo) à latitude do local de exposição.

A escolha do ângulo deve ser pautada de acordo com o objetivo do ensaio: por exemplo, exposição na vertical (90°) para simulação de condições sobre a face de um edifício ou exposição; exposição a 45° para efeitos de comparação com base em dados históricos (ISO 877-2, 2009). Reitera-se que, independentemente do ângulo estabelecido, a face inclinada dos suportes deve ser direcionada ao Equador, situação que caracteriza maior incidência solar ao longo do ano. O local destinado à fixação dos suportes deve ser livre de sombras produzidas pelo Sol e preferencialmente em áreas desmatadas e com cobertura típica da região ou por grama (ISO 877-1, 2009; ISO 877-2, 2009).

Figura 17 - Exposições climáticas em campo.



(a) Geotêxteis nos Estados Unidos.



(b) Geotêxteis no Brasil.



(c) Barreiras geossintéticas poliméricas no Brasil.



(d) Geotêxteis não-tecido em Portugal.

Fonte: (a) Koerner *et al.*, 1998; (b) Lodi *et al.*, 2008; (c) Yoshimura; Guimarães; Vidal, 2014; (d) Carneiro, 2009.

Os períodos de exposição podem ser escolhidos em função do tempo (dias, meses, anos) ou em termos de uma determinada irradiação de exposição (W/m^2), como radiação solar global ou radiação ultravioleta. Take *et al.* (2015) realizaram observações de campo, durante 4,7 anos, para análise de variações em ciclos térmicos na interface entre de barreiras geossintéticas poliméricas (GBR-P), ou geomembranas, de coloração preta e barreiras geossintéticas argilosas (GBR-C), ou forros geossintéticos argilosos, expostas diretamente a radiação solar (Figura 18).

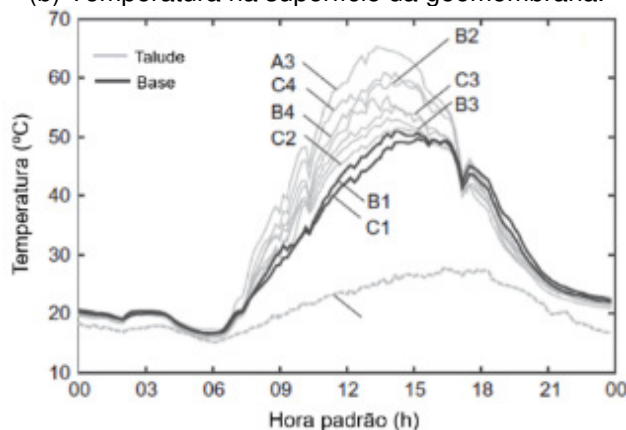
Figura 18 - Medidas de temperaturas em geossintéticos expostos à radiação solar.



(a) Área de estudo com medida aérea de termografia por infravermelho.



(b) Temperatura na superfície da geomembrana.



(c) Medidas de temperatura em um dia típico de verão.

Fonte: Take *et al.*, 2015. Adaptada pela autora.

Nas medidas térmicas, a partir de instrumentações espalhadas na superfície das barreiras geossintéticas (Figura 18c), verificaram a influência da radiação solar, da temperatura ambiente e, de modo secundário, da temperatura do solo adjacente, além da influência direta da época do ano e da inclinação de exposição. Os autores reportaram, por exemplo, uma diferença de 40°C a mais do que a temperatura ambiente medida no verão na interface entre os geossintéticos, além de ciclos térmicos diários na superfície entre 20°C e 60°C. O solo de contato atuou na retenção de calor da superfície dos geossintéticos durante os meses mais frios e menor fonte de calor para os meses mais quentes. Portanto, o efeito de tais ciclos térmicos diários em exposições de longo prazo podem acarretar alterações significativas nas propriedades dos geossintéticos (Take *et al.*, 2015).

Guimarães *et al.* (2020)⁵ avaliaram a durabilidade de um geotêxtil tecido de polipropileno por intemperismo de campo, bem como a influência da superfície de contato entre as amostras expostas e as estruturas metálicas. Foram utilizados dois pórticos no estudo, denominados de exposições do tipo aberta e fechada (Figura 19). A exposição do tipo aberta envolve a fixação das amostras em estrutura que permite o fluxo livre de ar entre as faces superior e inferior das amostras. Na exposição fechada, apenas a face frontal das amostras é submetida aos efeitos do intemperismo (ISO 877-1, 2009; ISO 877-2, 2009). As amostras foram expostas ao intemperismo durante 290 dias e a exposição do tipo fechada foi estruturada com uso de folha de metal pintada e com proteção à corrosão sobreposta a uma camada de geotêxtil para obter uma condição mais crítica de exposição, ao invés de madeira compensada ou naval especificado em norma.

Foram verificadas variações térmicas diárias com medidas de temperaturas diretamente nas superfícies do geotêxtil com termômetro de infravermelho, com resultados que indicaram tendências de variação térmica de 10 a 11°C entre as exposições aberta e fechada no início da tarde (Figura 19a). Este comportamento evidenciou uma ligeira diferença na resistência à tração máxima retida entre as exposições, a partir de valores médios de corpos e prova extraídos das amostras expostas (Figura 19d), cujo comportamento geral indicou tendências a maiores perdas para exposição fechada. Importante reportar acerca da diferença de temperatura

⁵ Ensaios realizados por Guimarães *et al.* (2020) referem-se ao mesmo local de estudo de durabilidade por intemperismo avaliado nesta pesquisa. Tais ensaios foram realizados no período de 20/05/2015 a 05/03/2016 e sem distinções entre as estações climáticas.

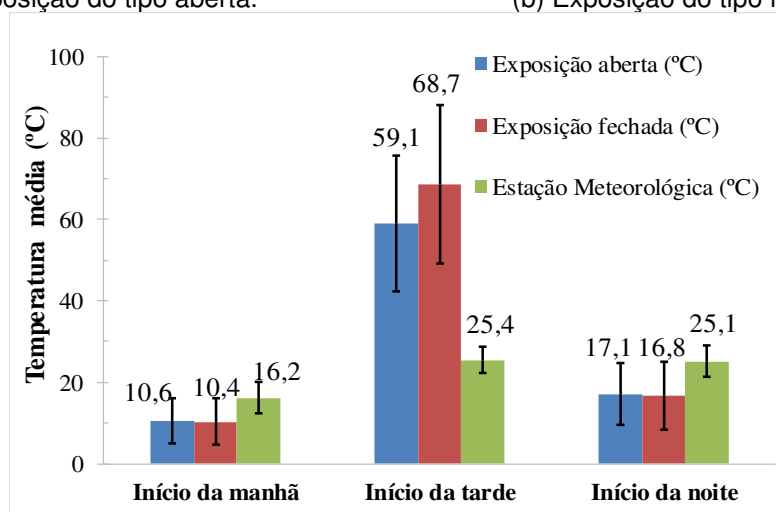
observada na superfície do geotêxtil no início da tarde (12:00 horas) em relação à temperatura horária obtida na estação meteorológica, com diferenças em torno de 34°C (exposição do tipo aberta) e 43°C (exposição do tipo fechada), conforme supracitado em Take *et al.* (2015).

Figura 19 - Durabilidade por intemperismo de geotêxtil tecido de polipropileno.

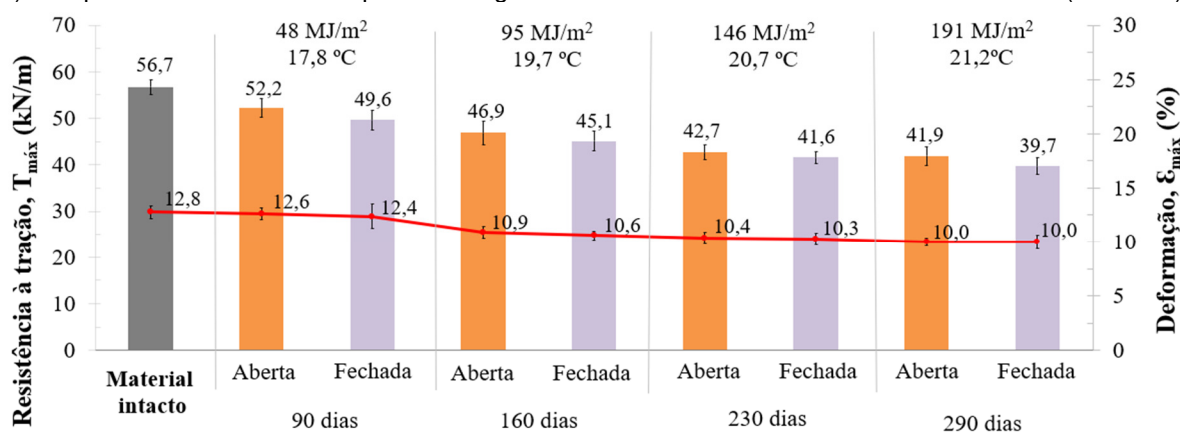


(a) Exposição do tipo aberta.

(b) Exposição do tipo fechada.



(c) Temperaturas médias na superfície do geotêxtil obtidas com termômetro infravermelho (290 dias).



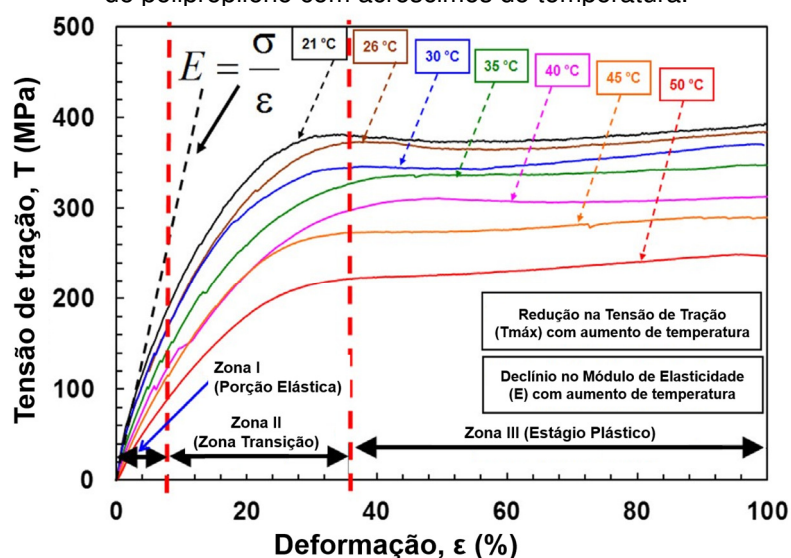
Condições da degradação por intemperismo

(d) Parâmetros mecânicos obtidos para os períodos de exposição.

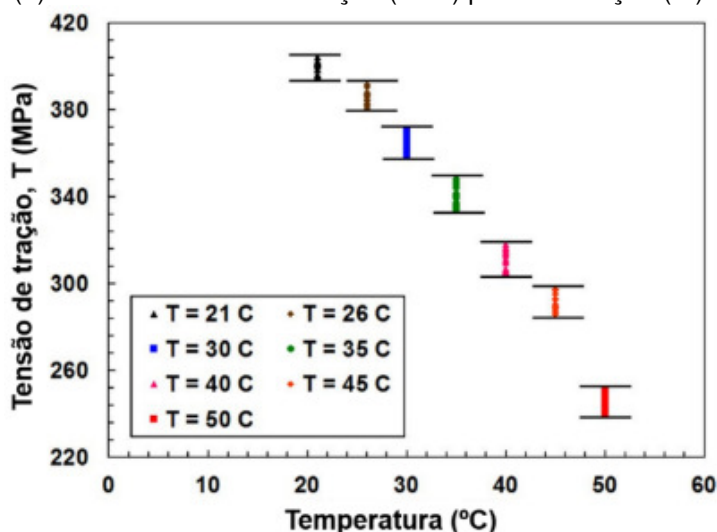
Fonte: Guimarães *et al.*, 2020. Adaptada pela autora.

No contexto da influência da temperatura na durabilidade de geossintéticos, Karademir e Frost (2014) realizaram investigação laboratorial para avaliar em microescala a influência de temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas em filamentos de geotêxtil não-tecido agulhado de polipropileno (Figura 20). Os filamentos foram tracionados em faixa de temperatura de 21°C a 50°C, com incrementos de 5°C, em equipamento DMA (Análise Térmica Dinâmico-Mecânica). Os gradientes de temperatura induziram diminuições nas propriedades mecânicas, como resistência à tração máxima e do módulo de elasticidade, o qual torna-se ainda mais dúcteis a temperaturas elevadas e perda de tenacidade (Karademir; Frost, 2014). Kockott (1989) afirma que, no caso de materiais poliméricos orgânicos, o aumento de 10°C pode induzir ao dobro da taxa de termo-degradação em ensaios acelerados.

Figura 20 - Comportamento mecânico em microescala de filamento de geotêxtil não-tecido agulhado de polipropileno com acréscimos de temperatura.



(a) Curvas de tensão de tração (MPa) por deformação (%).



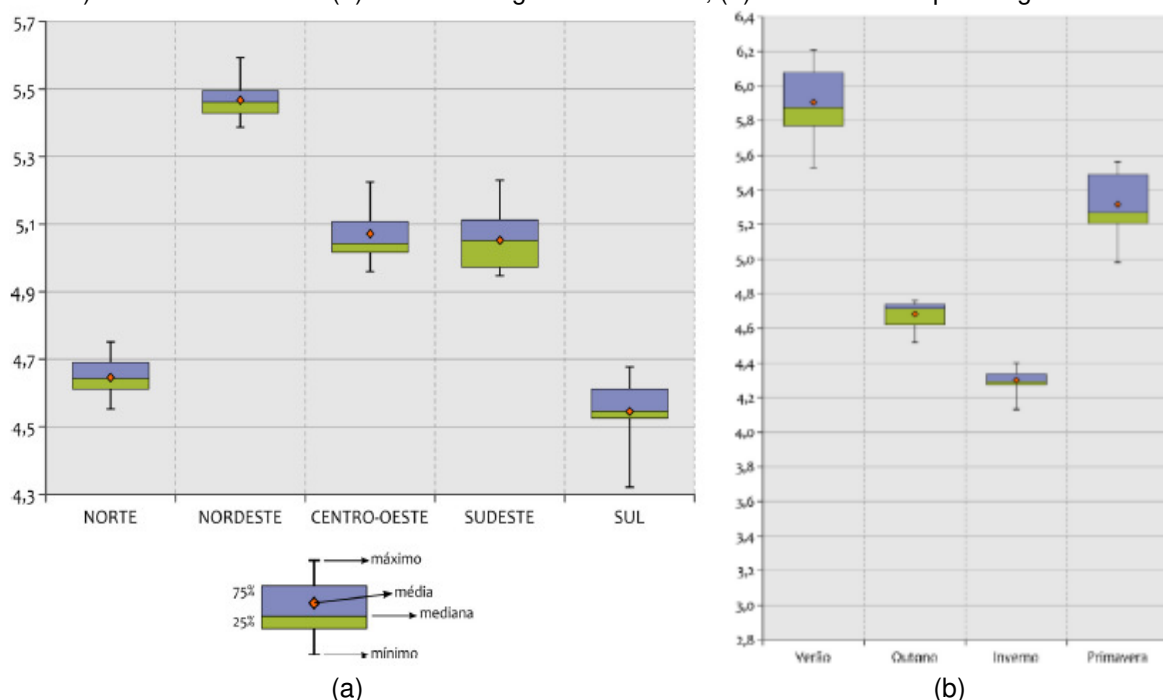
(b) Distribuição de dados obtidos de tensão de tração por temperatura (°C).

Fonte: Karademir; Frost, 2014. Adaptada pela autora.

Conforme já reportado, a incidência de radiação solar global varia em função das condições climáticas regionais, da latitude do local de exposição, intervalo de exposição, dentre outros. Portanto, torna-se necessário conhecer o comportamento da dinâmica climática local, por meio de tratamentos de parâmetros meteorológicos históricos ou a coleta de dados durante o intervalo de exposição às intempéries.

Pereira *et al.* (2017) aborda um levantamento da distribuição da energia solar no território brasileiro a partir de dados climatológicos coletados durante 17 anos (1999 a 2015). No território brasileiro verifica-se que há macrorregiões que apresentam níveis de radiação solar global semelhantes, inferiores ou superiores à média anual. A Figura 21 apresenta análises gráficas por diagramas de caixa (ou *boxplot*) para valores médios anuais dos totais diários de radiação global que contemplam variabilidades interanuais para as macrorregiões brasileiras. Em destaque, a variabilidade para região sudeste (Figura 21b), que considera a cidade de Varginha (Minas Gerais), abordada neste trabalho como local de estudo da durabilidade de geotêxteis.

Figura 21 - Variabilidade das médias anuais dos totais diários de irradiação global horizontal (em kWh/m²) entre 2005 e 2015: (a) Todas as regiões brasileiras; (b) Detalhamento para região sudeste.



Fonte: Pereira *et al.*, 2017. Adaptada pela autora.

Importante mencionar a realização de ensaios acelerados em laboratório, que apresentam como intuito avaliar se os geossintéticos atendem a requisitos mínimos de durabilidade a partir de condições padronizadas por recomendações normativas (ABNT NBR 16757-1, 2021; ASTM D 5819, 2022; ISO/TS 13434, 2020; Recomendação IGSSBrasil 002-1, 2014). Como principais vantagens, tem-se a redução

de períodos de ensaios, em comparação a ensaios de campo, bem como condições reprodutíveis para a análise do comportamento de materiais sob os principais fatores de degradação (Kockott, 1989). Ademais, são aplicáveis na obtenção de fatores de redução parciais (FR_p) para o dimensionamento de geossintéticos em diferentes aplicabilidades e com segurança e confiabilidade requeridas (Allen, 2016; Koerner; Hsuan; Koerner, 2017).

Ressalta-se que ensaios de laboratório são modelos físicos em condições controladas e que visam padronizar as premissas de inferência da durabilidade. Ou seja, não são diretamente correlacionados aos ensaios de campo, de modo que os resultados destes complementam as investigações laboratoriais para o entendimento das holísticas complexas envolvidas nos distintos fatores de degradação. Ademais, as condições de ensaios normatizados não simulam os efeitos da sinergia dos fatores de degradação que ocorrem nas inúmeras aplicações de campo (Carneiro; Almeida; Lopes, 2014; Corbella; Stretch, 2012).

Recomendações normativas em geossintéticos (ABNT NBR 16757-1, 2021; ISO/TR 20432, 2022; ISO/TS 13434, 2020) orientam quanto a intervalos máximos de exposição ao intemperismo de campo (Tabela 5) destinados a instalação de geotêxteis e seus produtos correlatos por ensaios de intemperismo acelerado (Figura 22), com a ponderação das resistências retidas e suas aplicações.

Tabela 5 - Períodos para exposição de geotêxteis e produtos correlatos durante a instalação.

Aplicação	Resistência à tração retida após ensaios pela EN 12224:2000	Tempo máximo de exposição (não coberto) durante a instalação	Fator de redução (FR_{IN})^b
Reforço ou aplicações cuja resistência a longo prazo é um parâmetro significativo	> 80%	1 mês ^a	Relação entre a resistência à tração intacta pela resistência retida do material exposto
	60% a 80%	2 semanas	1,25
	< 60%	1 dia	1,00
	Material não avaliado	1 dia	1,00
Outras aplicações	> 60%	1 a 4 meses ^a	***
	20% a 60%	2 semanas	***
	< 20%	Cobrir no dia da instalação	***

OBSERVAÇÃO: ^aExposição de até quatro meses pode ser aceitável em função da estação climática e local de exposição (por exemplo, na Europa); ^bDefinido pela norma ISO/TR 20432 (2022).

Fonte: ABNT NBR 16757-1 (2021); ISO/TR 20432 (2022); ISO/TS 13434 (2020). Adaptada pela autora.

Figura 22 - Principais componentes de um equipamento para ensaios de intemperismo acelerado.



(a) Lâmpadas fluorescentes de radiação ultravioleta.

(b) Bicos aspersores de água e pontos para saída de vapor d'água.

Fonte: da autora.

Os períodos de exposição requerem ensaios acelerados pela norma EN 12224 (2000), que padroniza a exposição total de 50MJ/m^2 em ciclos alternados entre radiação ultravioleta (UV) e choques térmicos (spray d'água), cuja incidência corresponde a um mês de exposição no Sul da Europa. A partir da resistência à tração retida e o tipo de aplicação em campo, definem-se os períodos máximos de exposição durante a instalação ou empregos acima do solo.

Especificamente para aplicações de reforço, não há necessidade de realização de ensaios acelerados se o período máximo de exposição for de até 12 horas. Em períodos de até 1 mês, caso a redução de resistência não seja superior a 5% ou sem significância estatística, não se aplicam fator de redução parcial por intemperismo, na condição de cobrimento do material em até um mês. Para geossintéticos que apresentem uma maior perda de resistência, é recomendado que o período de exposição não seja superior ao indicado na Tabela 5, além da aplicação de fator de redução (FR_{IN}) ao intemperismo. Em aplicações que requerem exposição superior a 1 mês, a recomendação é a testagem por ensaio acelerado, de modo a extrapolar a exposição radiante para a de vida de serviço esperada (ISO/TR 20432, 2022).

Para as barreiras geossintéticas, não há necessidade de ensaios acelerados por intemperismo se o tempo máximo de exposição for de até três dias e o material for usado protegido do intemperismo durante a vida de serviço de projeto. Para tempos de exposição de até 1 ano, as barreiras geossintéticas deverão reter 75% de resistência e deformação índices sob exposição UV acelerada de 350MJ/m^2 (ISO/TS 13434, 2020).

2.4 DURABILIDADE DE GEOSSINTÉTICOS POR FLUÊNCIA À TRAÇÃO

2.4.1 Introdução

Em suas diversas aplicações, geossintéticos submetidos a esforços de tracionamento podem induzir a ocorrência de fluência, ou seja, deformação sob um carregamento constante ao longo do tempo (Den Hoedt, 1986; Shukla, 2016; Shukla; Yin, 2006). Para maiores cargas, pode-se ocorrer a ruptura sob fluência, também denominado de resistência à ruptura ou fadiga estática (Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012; ISO/TS 13434, 2020; Shukla, 2016).

Os geossintéticos submetidos a carregamentos constantes se deformam enquanto a carga permanecer aplicada. A partir da sua retirada, parte das deformações ocorridas poderá ser permanente e o geossintético não retornará ao seu comprimento inicial. Esta ocorrência é denominada de comportamento viscoelástico dos polímeros, ou seja, as propriedades mecânicas são diretamente dependentes do tempo ou da taxa de carregamento, assim como de suas propriedades reológicas (Allen, 2016; Cooke; Rebenfeld, 1988). De modo genérico, polímeros viscoelásticos podem sofrer deformações plásticas em níveis relativamente baixos de carga, se comparado a sua resistência mecânica característica. Neste caso, há uma redução direta da vida de projeto esperada a estes materiais (Maxwell *et al.*, 2005).

Em aplicações com geossintéticos sujeitos a solicitação mecânica por fluência à tração, o entendimento referente a este comportamento é de suma importância no delineamento dos parâmetros de vida de serviço de projeto. Por exemplo, a adoção de fatores de redução parciais por fluência (FR_{FL}) e, também, a estimativa se uma determinada solicitação poderá ocasionar deformações a níveis que possam comprometer a segurança de projetos e, até mesmo, a ruptura por fluência (Costanzi *et al.*, 2003; França; Bueno; Zornberg, 2011).

O impacto da fluência não é apenas na ruptura do material sob carregamento constante, mas também em deformações que ultrapassam os limites de projeto para garantia de desempenho satisfatório ao longo do tempo. Em solos reforçados com geotêxteis, tais deformações excessivas podem acarretar deformações, deslocamento ou a curvatura da estrutura (Allen, 2016; ISO/TR 20432, 2022).

Para geotêxteis em aplicações costeiras e tubos geotêxteis para desaguamento e sistemas de confinamento de resíduos, as deformações por fluência devem ser inferiores ao especificado, de modo que as resistências à tração máxima e as

emendas sejam suficientes para resistirem as solicitações por bombeamentos cíclicos de enchimentos por materiais arenosos e resíduos, respectivamente, e na consolidação final pelo desaguamento (Bezuijen; Vasternburg, 2013; Cantré; Saathoff, 2011; Lawson, 2008; Leshchinsky *et al.*, 1996; Leshchinsky; Leshchinsky, 2002).

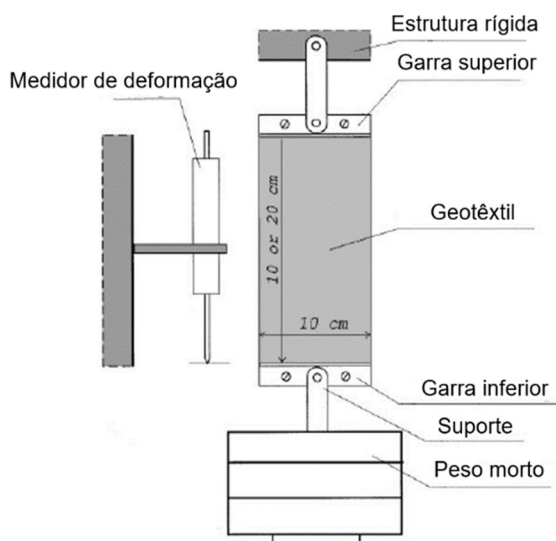
2.4.2 Ensaios de fluência em geossintéticos

A fluência em geossintéticos pode ser analisada por ensaios normatizados, os quais consistem na aplicação de uma carga constante por largura do corpo-de-prova ao longo do tempo. A partir deste ensaio índice, é possível obter os seguintes dados, normalmente esboçados por gráficos: deformações percentuais ao longo do tempo; tempo decorrido até a ruptura por fluência; nível de carga para a ruptura por fluência, dentre outros. A Figura 23 apresenta alguns exemplos de ensaios de fluência à tração não confinada em geossintéticos, de modo que os carregamentos podem ser realizados com uso de cargas estatísticas ou por sistemas de alavancas.

As normas para ensaios de fluência sob tração não confinada (ABNT NBR ISO 13431, 2022; ASTM D 5262, 2021; ISO 13431, 1999) especificam como cargas de ensaio 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% da resistência à tração máxima do geossintético, e intervalos de tempo para verificação de deformações sob fluência em 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 60 min, 2h, 4h, 8h, 24h, 3 dias, 7 dias, 14 dias, 21 dias e 42 dias. Com a aplicação dos percentuais de cargas preconizados, objetiva-se a obtenção de deformações por fluência e, no caso de se determinar a ruptura por fluência, os valores de carga compreendem a faixa de 50% a 90% da resistência à tração do geossintético. Se verificada a ruptura por fluência, anota-se o tempo decorrido desde a aplicação da carga.

A duração mínima de ensaios de fluência para caracterização índice deve ser de 1.000 horas (42 dias), enquanto os ensaios destinados a uma análise completa das propriedades de fluência devem durar até 1 ano (8.760 horas) ou 10.000 horas (Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012; Shukla; Yin, 2006). Os ensaios em período mínimo de 10.000 horas são aplicáveis para as condições padronizadas (até 1.000 horas) não se obter resultados condizentes do comportamento por fluência a longo prazo (ASTM D 5262, 2021).

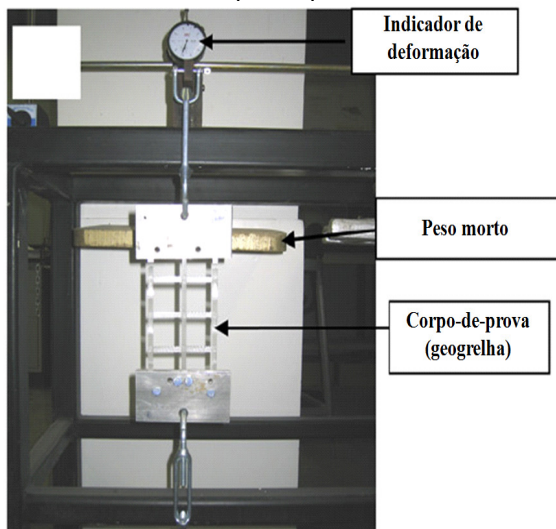
Figura 23 - Ensaios de fluência à tração em geossintéticos.



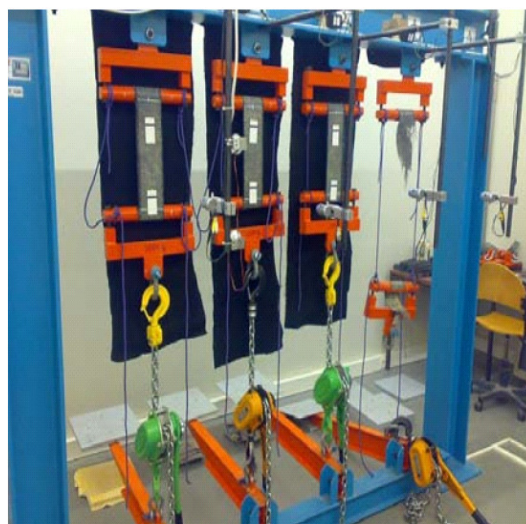
(a) Fonte: Sawicki; Kazimierowicz-Frankowska, 1998. Adaptada pela autora.



(b) Fonte: Costanzi, 2003.



(c) Fonte: Yeo; Hsuan, 2010. Adaptada pela autora.



(d) Fonte: Carneiro, 2009.



(e) Fonte: Koo *et al.*, 2008.



(f) Fonte: Dobie, 2016.

Como destacado por Dobie (2016), a manutenção da temperatura constante em ensaios padronizados em laboratório e as condições adequadas de fixação das garras, e conjunto de cargas estáticas, são condições essenciais para a obtenção de resultados de fluência consistentes e representativos.

As deformações por fluência em geossintéticos com o tempo são normalmente representados por uma função logarítmica, conforme apresentado na Equação 5, bem como indicado na Figura 24, com a obtenção da taxa de fluência (b) a partir da inclinação da curva de deformação para um determinado tempo. Tais dados são de suma importância na análise da deformação total para sistemas construtivos com geossintético (Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012; Shukla, 2016).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + b \cdot \log(t) \quad (5)$$

Dado que,

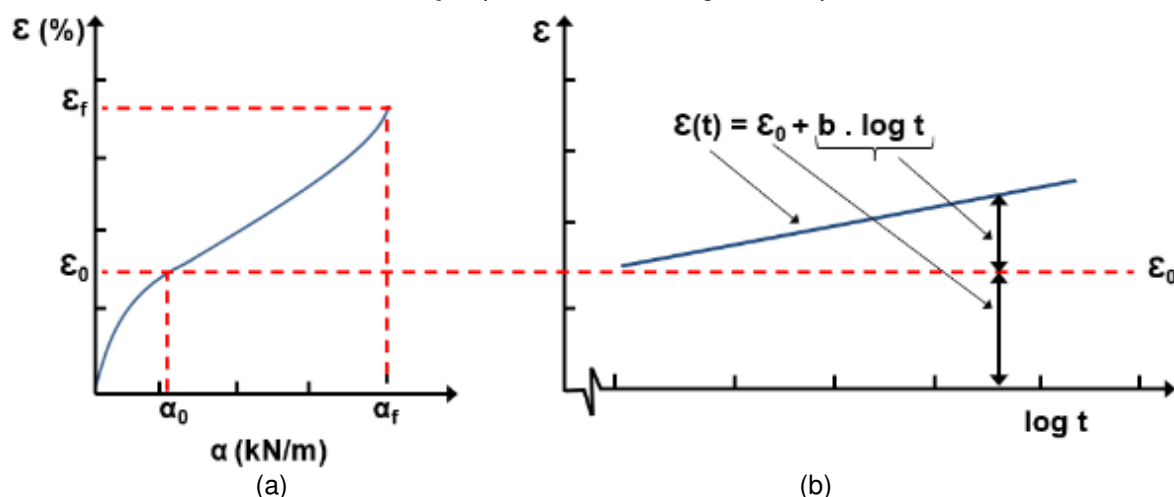
$\varepsilon(t)$ = deformação do material (em %);

ε_0 = deformação inicial sob fluência;

b = taxa de fluência;

t = tempo decorrido de ensaio (em horas).

Figura 24 - Comportamento sob fluência: (a) Deformação em relação a carga aplicada; (b) Deformação por fluência ao longo do tempo.

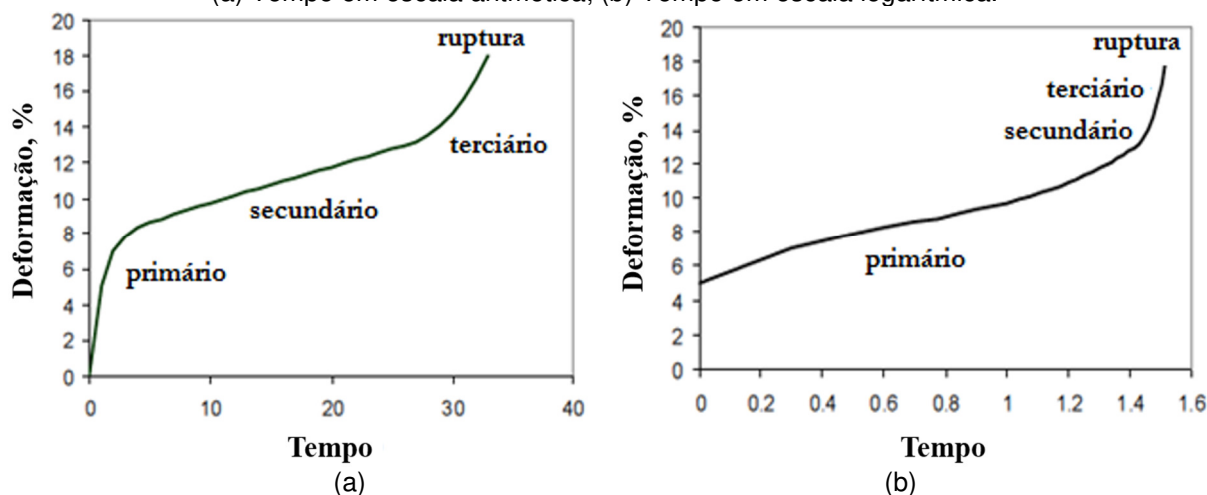


Fonte: Den Hoedt, 1986. Adaptada pela autora.

As curvas típicas de fluência de materiais poliméricos, que relacionam tempo por deformação, podem ser divididas em três regiões (Figura 25), denominadas de Região I (fluência primária), Região II (fluência secundária) e Região III (fluência terciária).

Região I caracteriza-se como um aumento rápido de fluência nos primeiros instantes e posterior diminuição da taxa de deformação ao longo do tempo. Região II apresenta taxa mais uniforme de deformação e comportamento tipicamente linear em escala aritmética. Região III é a região de ocorrência da ruptura do material devido a um rápido aumento na taxa de fluência com o tempo (Maxwell *et al.*, 2005).

Figura 25 - Diagrama esquemático das deformações primário, secundário e terciário sob fluência.
(a) Tempo em escala aritmética; (b) Tempo em escala logarítmica.



Fonte: Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012. Adaptada pela autora.

A taxa de deformação por fluência de geossintéticos foi modelada a partir da lei de potência (Hibbitt *et al.*, 1998 *apud* Perkins, 2000), apresentada na Equação 6:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = (A\sigma^n[(m+1)\varepsilon^{cr}]^m)^{1/(m+1)} \quad (6)$$

Dado que,

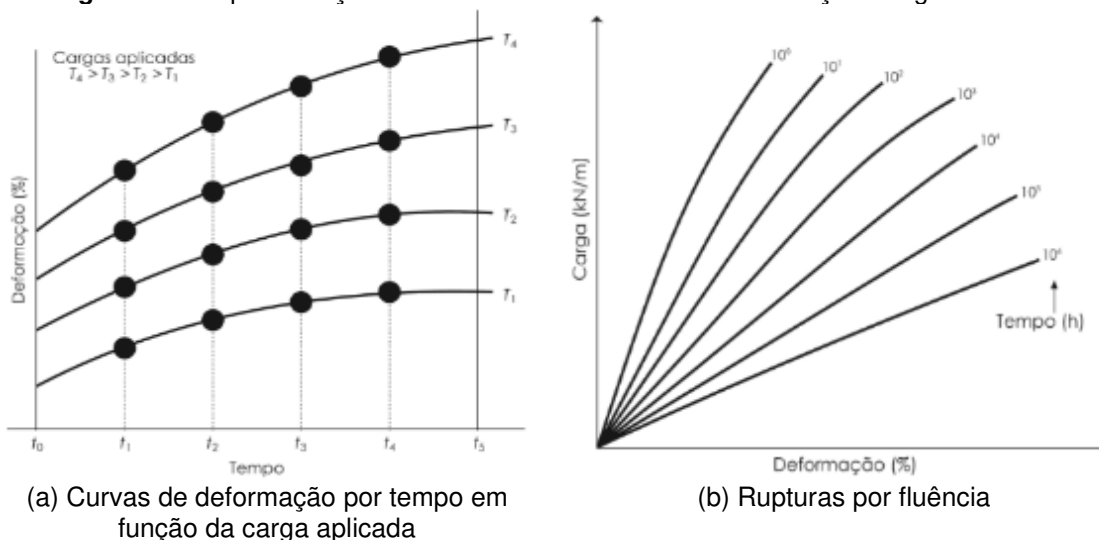
A, n e m = constantes matemáticas;

σ = carga de fluência uniaxial;

ε^{cr} = deformação por fluência.

As curvas de deformação por fluência estão diretamente relacionadas às cargas aplicadas, ou seja, maiores taxas de deformações são obtidas em maiores cargas. Além disso, com o aumento do nível de carga, é possível se atingir a ruptura por fluência em menor tempo. A Figura 26 ilustra curvas isócronas que podem ser obtidas em ensaios índices de fluência à tração de geossintéticos, normalmente referentes a cargas de fluência entre 10% e 60% da resistência à tração dos geossintéticos.

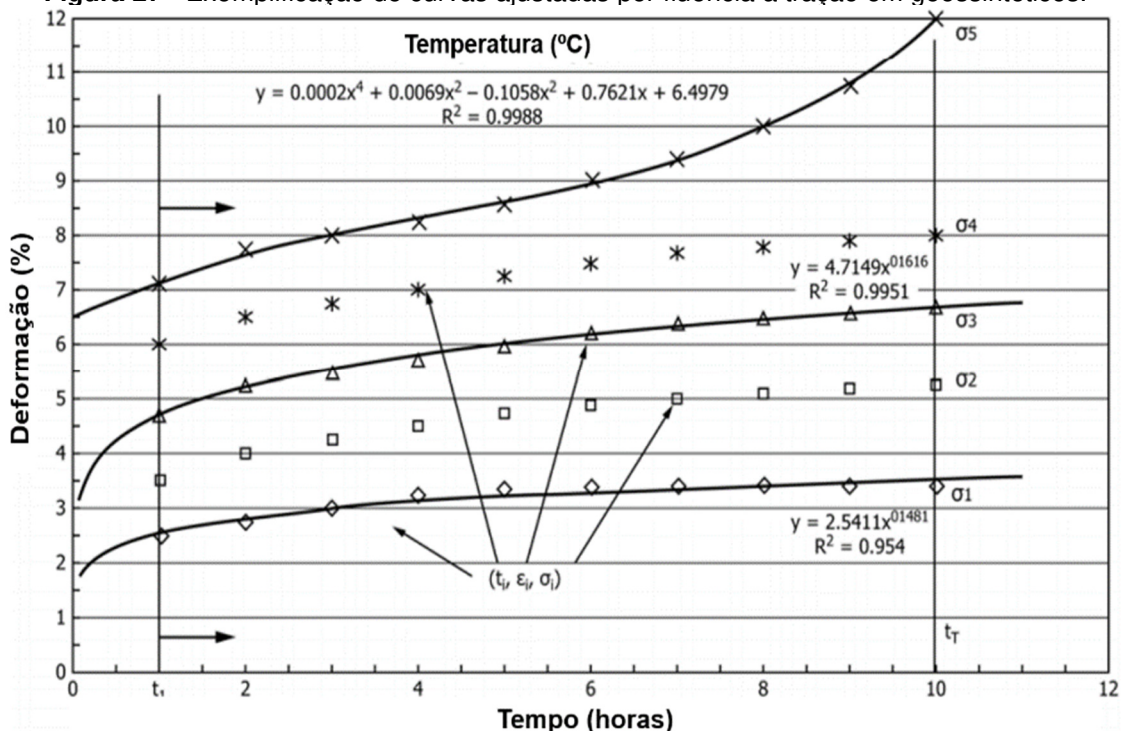
Figura 26 - Representação de curvas isócronas de fluência à tração em geossintético.



Fonte: Bueno; Vilar, 2015.

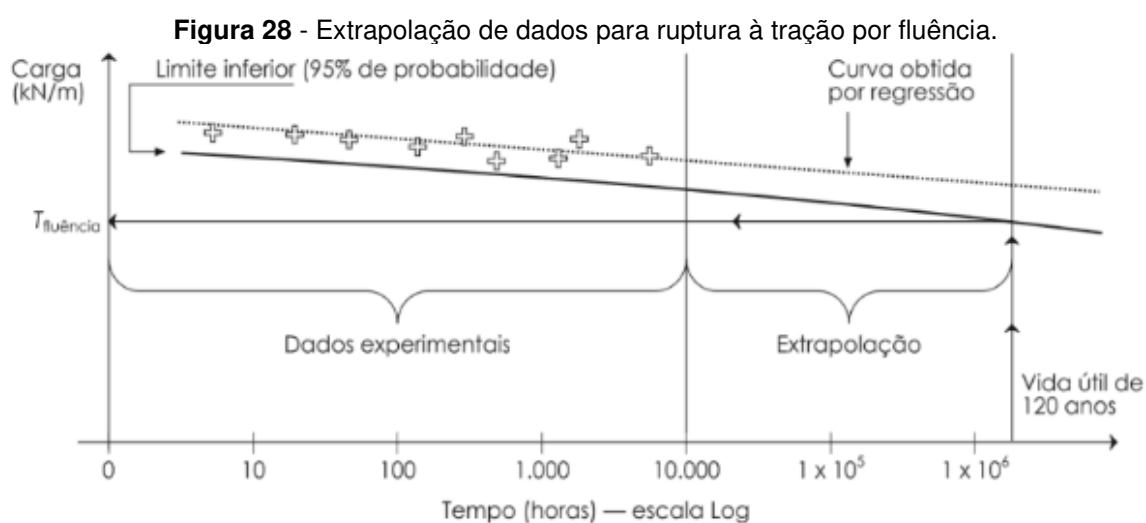
A norma ASTM D 5262 (2021) aborda que as curvas de fluência podem ser ajustadas por meio da análise por regressão (ver detalhes em 3.3.3), para obtenção de funções lineares ou não-lineares que mais se ajustam a distribuição das deformações por fluência no tempo por níveis de cargas, conforme indicado por σ_1 a σ_5 na Figura 27. A partir de tais dados, realizam-se extrapolações para se estimar o comportamento de fluência para uma determinada vida de projeto. Ou seja, a obtenção de diagramas que correlacionam cargas de fluências aplicadas (em diferentes níveis), *versus* o tempo até a ruptura por fluência.

Figura 27 - Exemplificação de curvas ajustadas por fluência à tração em geossintéticos.



Fonte: ASTM D 5262, 2021. Adaptada pela autora.

As referidas extrapolações devem ser simples para o fornecimento de ajustes razoáveis dos resultados, por exemplo, com aplicação da lei de potência (ISO/TR 20432, 2022). O ajuste dos dados de tempo (em escala logarítmica) pela carga de fluência aplicada (ou percentual da resistência à tração) tendem a apresentar um comportamento linear (Bueno; Vilar, 2015) como ilustrado na Figura 28. Ressalta-se que a norma ISO/TR 20432 (2022) apresenta detalhes da interpretação e plotagem de resultados de fluência à tração para a obtenção de parâmetros de dimensionamento de projetos, tanto para ensaios convencionais quanto acelerados por sobreposições de temperaturas.

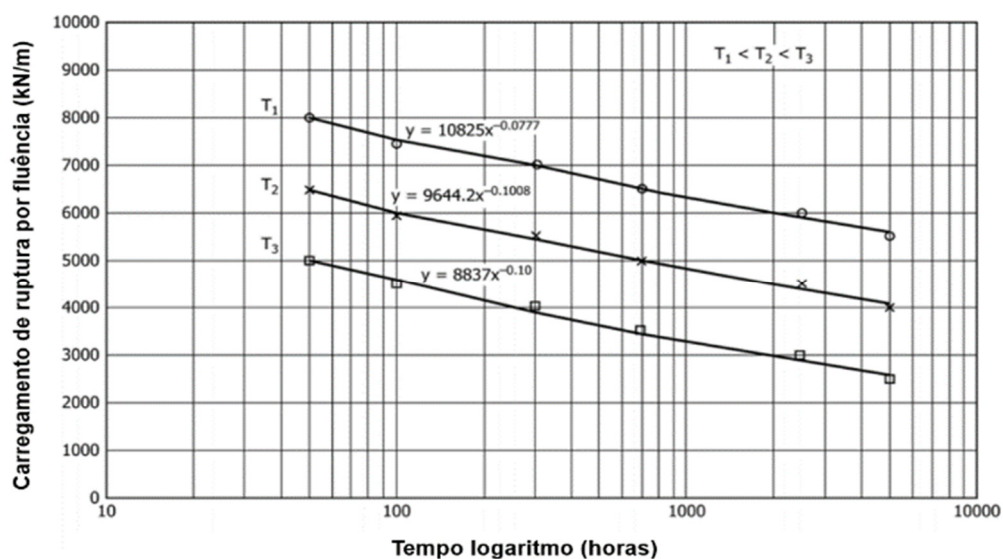


Fonte: Bueno; Vilar, 2015.

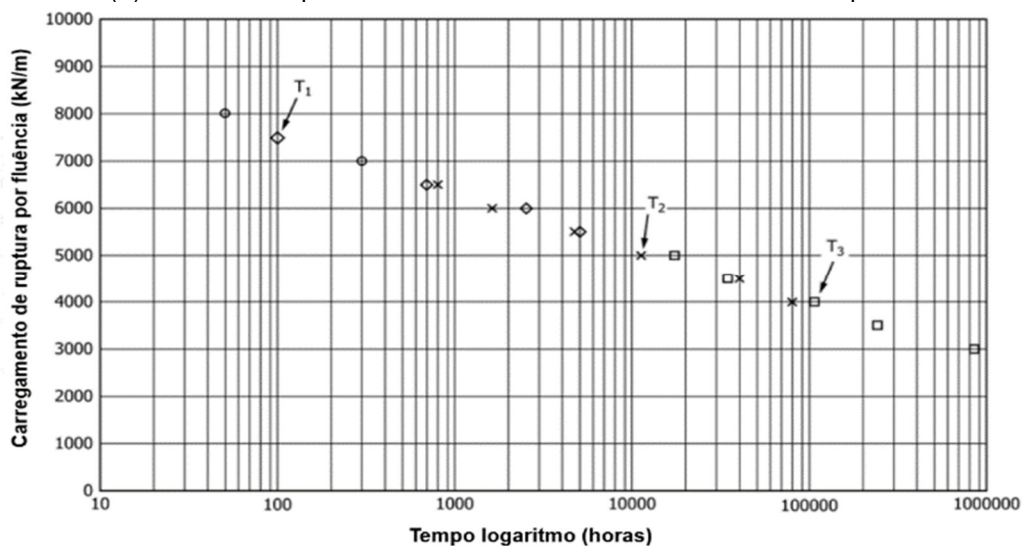
A norma ASTM D 5262 (2021) apresenta requisitos para ensaios de fluência acelerada com o intuito de se obter análises da ruptura por fluência à tração por procedimento de superposição tempo-temperatura. Compreende-se a realização de ensaios em diferentes níveis de carga a temperaturas elevadas (por exemplo, três níveis de temperatura). No primeiro instante, obtêm-se curvas convencionais nas várias temperaturas, que posteriormente são sobrepostas por tempo para a obtenção da curva de ruptura por fluência em longo prazo e seu ajuste por análise de regressão (Figura 29).

A temperatura exerce um importante fator de estudos de deformação por fluência até a sua ruptura, com a obtenção de resultados em menores tempos se comparados aos ensaios de fluência à tração convencionais. Este fator atua na energia de ativação das cadeias poliméricas e, assim, nos coeficientes de expansão termal, o qual induz a movimentações de massa entre os interstícios existentes e, portanto, a ocorrência de deformações viscoelásticas (Costanzi *et al.*, 2003).

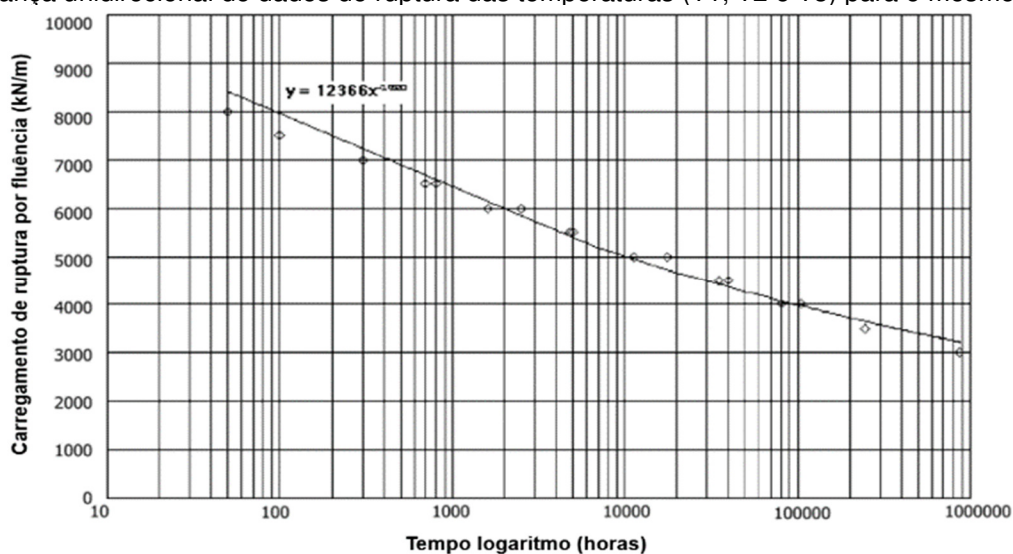
Figura 29 - Obtenção da curva de ruptura por fluência à tração pela metodologia de superposição tempo-temperatura.



(a) Curvas de ruptura de fluência convencionais em várias temperaturas.



(b) Mudança unidirecional de dados de ruptura das temperaturas (T_1 , T_2 e T_3) para o mesmo gráfico.



(c) Curva de ruptura por fluência de longo prazo.

Fonte: ASTM D 5262, 2021. Adaptada pela autora.

Outra possibilidade de ensaio acelerado em fluência é denominada *Stepped Isothermal Method* (SIM), que compreende em aumentos graduais de temperatura em uma única amostra de geossintético pela proposição inicial de Thornton *et al.* (1998) e, posteriormente, a publicação da norma ASTM D 6992 (2016). Além da vantagem quanto a aceleração dos níveis de deformação com os aumentos graduais de temperatura, ocorre a atenuação da variabilidade entre as amostragens dos geossintéticos, se comparado a ensaios para obtenção de curvas de deformação em temperaturas elevadas, porém separadamente.

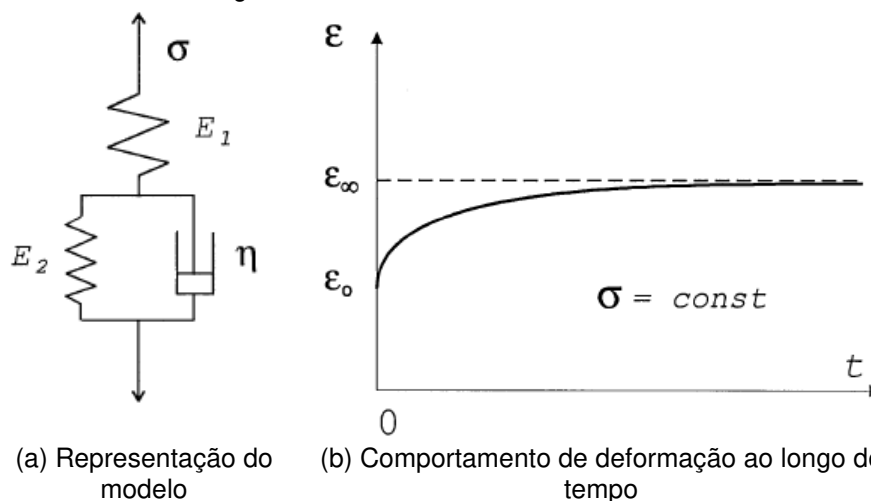
Bueno, Costanzi e Zornberg (2005) obtiveram curvas de fluência por ensaios convencionais (1.000 horas) e pelo método SIM (quatro estágios de temperatura e total de 8 horas) em geotêxtil não-tecido de polipropileno submetido a quatro níveis de carregamentos. Os autores reportaram que, apesar das diferenças obtidas nas deformações iniciais, atribuídas a variabilidade de rigidez à tração entre as amostras e a fixação destas no sistema de fluência, que podem afetar as deformações principalmente em maiores velocidades de carregamentos iniciais, os comportamentos por fluência foram semelhantes entre os métodos analisados. Diversos outros estudos laboratoriais já foram publicados a partir de ensaios de fluência aceleradas (por exemplo, Baras; Bueno; Costa, 2002; Costanzi *et al.*, 2003; Koo *et al.*, 2008; Yeo; Hsuan, 2010; Zornberg; Byler; Knudsen, 2004).

2.4.3 Modelo reológico de fluência à tração

Sawicki e Kazimierowicz-Frankowska (1998) apresentam um modelo mecânico do tipo Sólido Linear Padrão (do inglês, *Standard Linear Solid*, SLS) que prognostica a relaxação de materiais poliméricos e, assim, pode ser aplicado aos geossintéticos em condições de baixo nível de carregamento, o qual limita a deformação primária por fluência. Trata-se de um modelo reológico viscoelástico com três parâmetros principais ligados em série (Figura 30): componente mola, definido pelo módulo de elasticidade para as deformações elásticas (E_1); sistema Kelvin caracterizado por componente mola para deformações elásticas (E_2); componente amortecedor referente a viscosidade (η) do material.

A componente E_1 relaciona-se a deformação elástica primária pelo carregamento do geossintético com a carga constante. Com a manutenção desta carga, ocorrem as deformações ao longo do tempo (E_2) diretamente relacionadas a viscosidade (η) intrínseca do geossintético (Sawicki; Kazimierowicz-Frankowska, 1998).

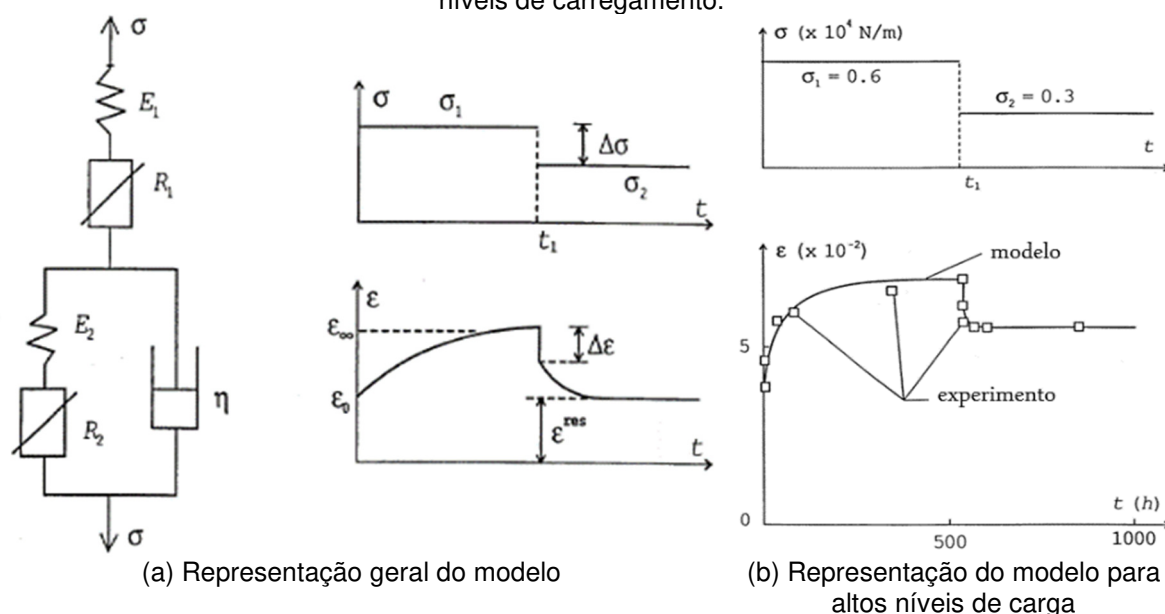
Figura 30 - Modelo mecânico de deformação por fluência à tração em geossintéticos para carregamento constante de baixa intensidade.



Fonte: Sawicki; Kazimierowicz-Frankowska, 1998.

Contudo, os mesmos autores (Sawicki; Kazimierowicz-Frankowska, 1998) apontam que, em situações de carregamento e descarregamento por fluência, tanto para baixos e altos níveis de tensão, o modelo mecânico da Figura 30 não se aplica, pois não ocorre a recuperação de toda deformação ocorrida inicialmente, o qual se desconfigura da assíntota para a deformação no tempo. Neste caso, é necessário considerar as deformações plásticas (R_1 e R_2) ocorridas durante o carregamento por fluência, bem como a deformação residual (ϵ^{res}). A Figura 31 ilustra o modelo reológico modificado para carregamento e descarregamento para diferentes níveis de carregamento.

Figura 31 - Modelo mecânico de deformação por fluência à tração em geossintéticos para diferentes níveis de carregamento.



Fonte: Sawicki; Kazimierowicz-Frankowska, 1998. Adaptada pela autora.

Em termos de deformação linear, tem-se modelo matemático (Equação 7) cuja resposta é a deformação ε em função do tempo, bem como de E_1 , E_2 e η indicados na Figura 30 (Maxwell *et al.*, 2005):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right) \quad (7)$$

Dado que,

ε = deformação linear;

σ_0 = tensão de fluência;

E_1 = módulo de deformabilidade para as deformações elásticas;

E_2 = sistema Kelvin para deformações elásticas;

η = viscosidade do material;

τ_1 = tempo de relaxação, dado por (Equação 8):

$$\tau_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \quad (8)$$

2.4.4 Fatores que influenciam o comportamento à fluência por tração

O comportamento dos geossintéticos sob fluência à tração depende de vários fatores, como tipo, estrutura e processo de fabricação, geometria do geossintético, constituição polimérica, nível de carga aplicado, temperatura de ensaio, tempo e velocidade de aplicação da carga, presença ou não de confinamento, dentre outros (Allen, 2016; Den Hoedt, 1986; França; Bueno; Zornberg, 2011; Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012; Sawicki; Kazimierowicz-Frankowska, 1998).

A constituição polimérica exerce influência direta nos rearranjos e deslocamentos entre as cadeias poliméricas por sua rigidez e forças de coesão intermoleculares, que podem ser por Van der Waals, interações dipolo, ligações de hidrogênio, dentre outros (Cooke; Rebenfeld, 1988). As poliolefinas (polipropileno e polietileno) são mais suscetíveis a deformação por fluência por serem formadas por cadeias lineares com ausência de ligações cruzadas, as quais podem apresentar as três regiões de fluência (como apresentado na Figura 25), ao passo que o politereftalato de etileno (PET) e poliamida (PA) normalmente apresentam apenas as deformações primária e terciária (Den Hoedt, 1986; Greenwood; Schroeder; Voskamp, 2012).

As poliolefinas são estruturadas por forças coesivas intermoleculares do tipo Van der Waals (mais fracas), o poliéster apresenta maior rigidez da cadeia por ser um polímero parcialmente aromático e com maior empacotamento das cadeias moleculares e as poliamidas estruturam-se por fortes ligações de hidrogênio intermoleculares e maiores coesões entre cadeias (Cooke; Rebenfeld, 1988). Deste modo, o polipropileno (PP) e o polietileno (PE) tendem a apresentarem deformações maiores que o poliéster (PET) e a poliamida (PA).

Ademais, o polipropileno e o polietileno podem apresentar perdas de suas propriedades mecânicas sob solicitações por fluência em períodos relativamente curtos em comparação ao poliéster (Bezuijen; Vasternburg, 2013), conforme indicado na Tabela 6. Em aplicações de reforço, cargas admissíveis em torno de 40-50% são recomendados para geotêxteis PET e PA em aplicações de longo prazo (até 75-100 anos); para geotêxteis PP e PE, tais cargas são em torno de 20 a 25% da resistência máxima do material (WU, 2019).

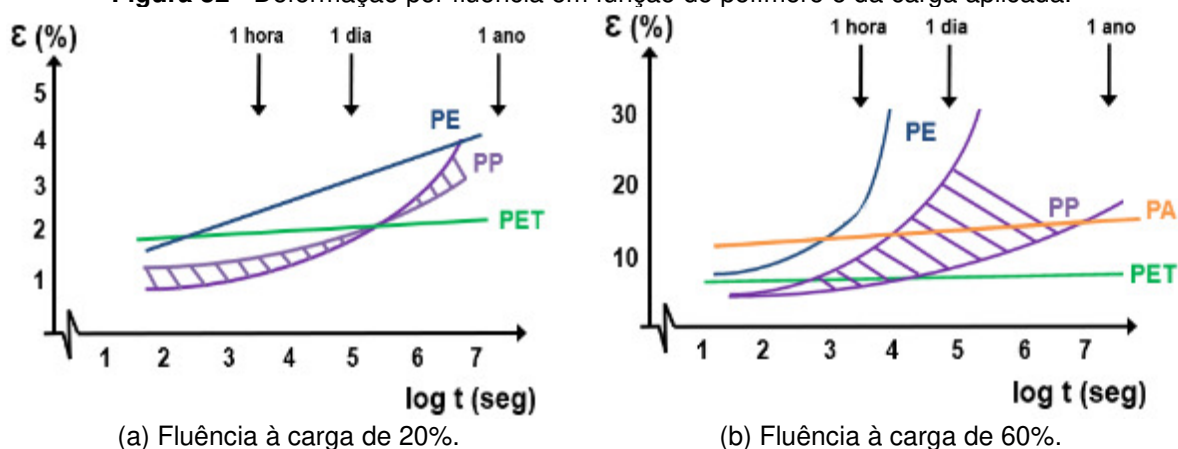
Tabela 6 - Resistência à tração admissível em relação à resistência inicial devido à fluência a 20°C.

Polímero	Porcentagem de resistência máxima à tração devido à fluência		
	2 anos	10 anos	50 anos
Poliéster	75%	70%	60%
Polipropileno	50%	40%	25%
Polietileno	50%	40%	25%

Fonte: Bezuijen; Vasternburg, 2013. Adaptada pela autora.

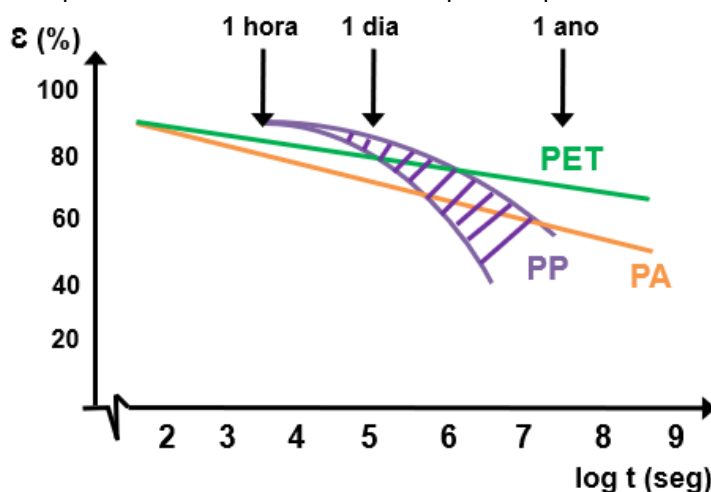
A Figura 32 apresenta comportamentos típicos de deformação por fluência em função do nível de carga aplicado para os polímeros supramencionados. Na Figura 33, tem-se a ruptura por fluência (Den Hoedt, 1986).

Figura 32 - Deformação por fluência em função do polímero e da carga aplicada.



Fonte: Den Hoedt, 1986. Adaptada pela autora.

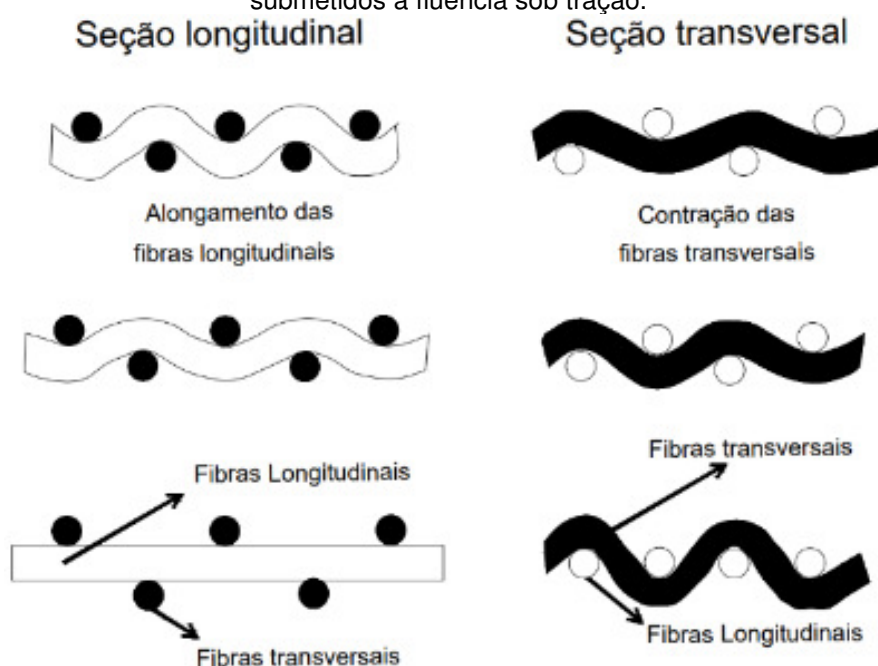
Figura 33 - Ruptura sob fluência característico para os polímeros PET, PA e PP.



Fonte: Den Hoedt, 1986. Adaptada pela autora.

A partir do comportamento de fluência dependente da estrutura do geossintético, no caso de geotêxteis tecidos submetidos a carregamento no sentido longitudinal de fabricação, por exemplo, verifica-se a ocorrência de deformação das fibras longitudinais e uma contração das fibras transversais (denominada de contração lateral), conforme ilustrado na Figura 34 (Den Hoedt, 1986). Para tanto, ressalva-se a importância da realização de medidas de deformações nos dois sentidos de fabricação em estudos de fluência em geotêxteis tecidos. Como destacado por Cooke e Rebenfeld (1988), a durabilidade de longo prazo de geotêxteis no desempenho de suas funções depende das propriedades das fibras e de sua estruturação.

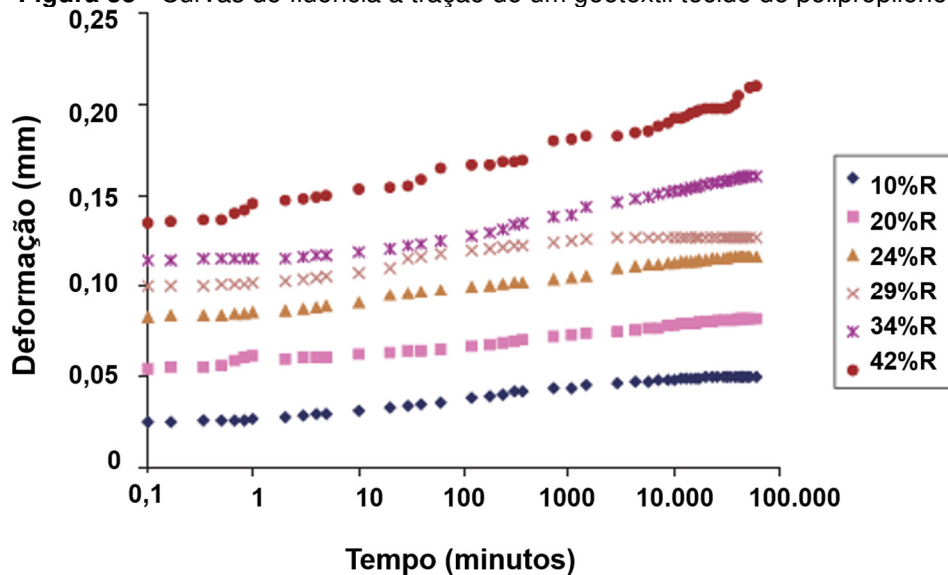
Figura 34 - Comportamento típico das fibras longitudinais e transversais em geotêxteis tecidos submetidos a fluência sob tração.



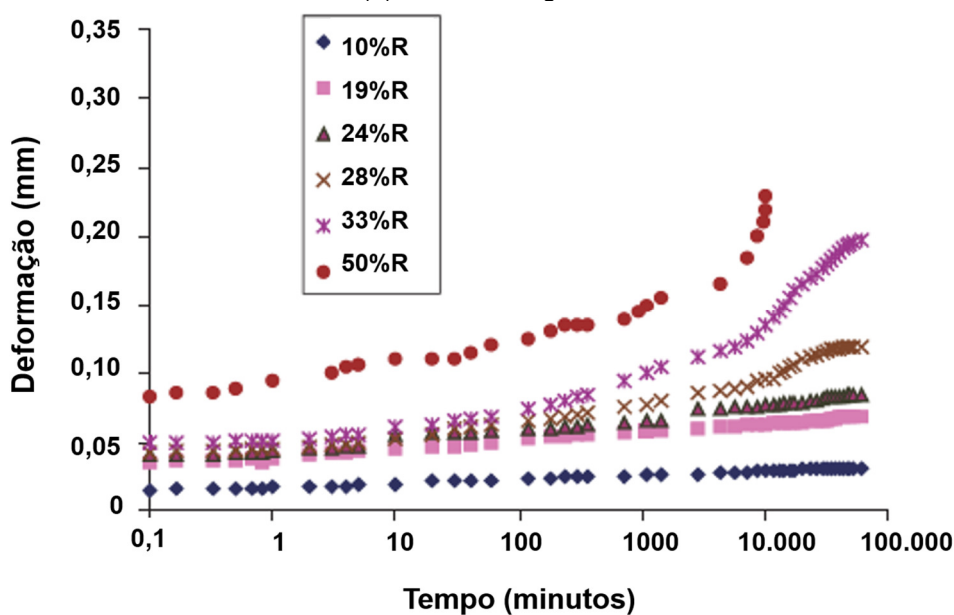
Fonte: Den Hoedt, 1986. Adaptada pela autora.

Ensaio realizados por Kazimierowicz-Frankowska (2005) em geotêxteis tecidos de polipropileno evidenciaram comportamentos distintos de deformação entre os sentidos de fabricação e para diferentes níveis de carregamento, o qual se caracteriza como um material anisotrópico (Figura 35). Maiores deformações inicial e final foram observadas no sentido longitudinal de fabricação, devido ao comportamento das fibras no sentido transversal ser caracterizado pela contração e depender diretamente do entrelaçamento entre as fibras.

Figura 35 - Curvas de fluência à tração de um geotêxtil tecido de polipropileno.



(a) Sentido longitudinal.



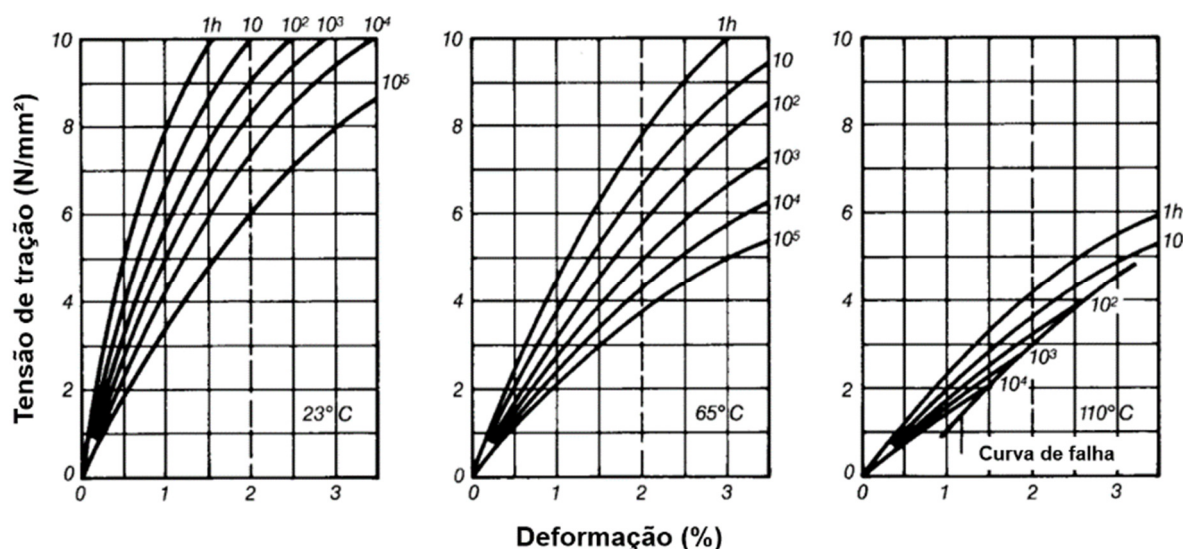
(b) Sentido transversal.

Fonte: Kazimierowicz-Frankowska, 2005. Adaptada pela autora.

A temperatura é um dos fatores que exerce influência considerável na aceleração de deformações por fluência, de modo que, para um mesmo nível de carga sob

fluência, ao se aumentar a temperatura, atinge-se maiores níveis de deformação e até mesmo a ruptura em menor intervalo de tempo (Shukla, 2016). Em temperaturas abaixo da transição vítrea (T_g) para os polímeros termoplásticos, como o polipropileno (PP), a razão de fluência é baixa devido à restrição de mobilidade da cadeia molecular. Contudo, acima da T_g , verifica-se um fluxo viscoso pelo maior deslizamento das cadeias moleculares. Por exemplo, a temperatura de transição vítrea (T_g) do polipropileno é em torno de -20°C e a temperatura de fusão (T_m) é na faixa de $165-177^{\circ}\text{C}$ (Smith; Hashemi, 2012). A Figura 36 apresenta curvas isócronas de fluência para homopolímeros de polipropileno em três níveis de temperatura.

Figura 36 - Curvas isócronas de fluência à tração em polipropileno em diferentes temperaturas.



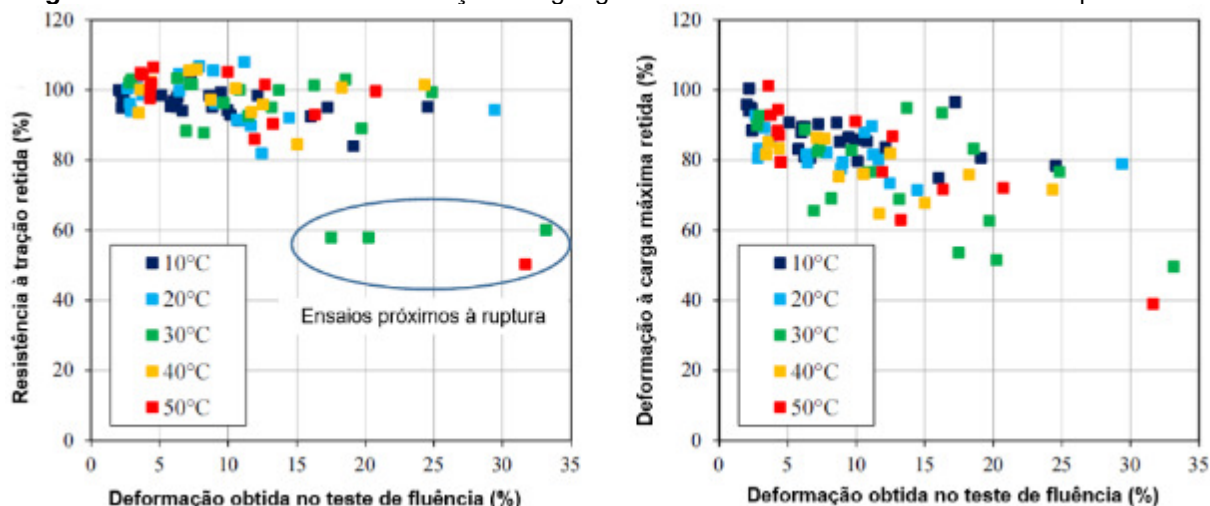
Fonte: Maier; Calafut, 1998. Adaptada pela autora.

A Figura 37 reporta a resultados obtidos em 86 amostras de geogrelhas de PEAD em cinco temperaturas (10°C a 50°C). Parâmetros de resistência à tração e deformação retidos foram obtidos com o encerramento dos ensaios antes de rupturas por fluência, cujos resultados foram dependentes da temperatura. Alguns destes ensaios apresentaram mais de 5 anos de duração, com deformações em torno de 30%. Apesar da resistência à tração de curto prazo ter permanecido essencialmente a mesma dos geossintéticos intactos, as deformações por fluência tornaram este geossintético ligeiramente mais rígido (Dobie, 2016).

A radiação ultravioleta (UV) também exerce influência em taxas de deformação de polímeros, devido a susceptibilidade de fotodegradação. Discussões feitas por Arutyunyan (2005) abordaram os efeitos da radiação UV em deformações laterais de compósitos poliméricos não lineares. Devido a fotodegradação ocasionar cisões nas cadeias poliméricas, com consequente redução em seu peso molecular e no grau de

polimerização, ocorreram reduções no coeficiente de viscosidade (η), aumentos na taxa de deformação por fluência à tração e consequente redução no tempo de fratura do compósito polimérico. A viscosidade polimérica, abordada na Equação 7, envolve a reticulação dos polímeros e a sua diminuição por degradação é devido a consequente redução do seu peso molecular e no grau de polimerização (De Paoli, 2008).

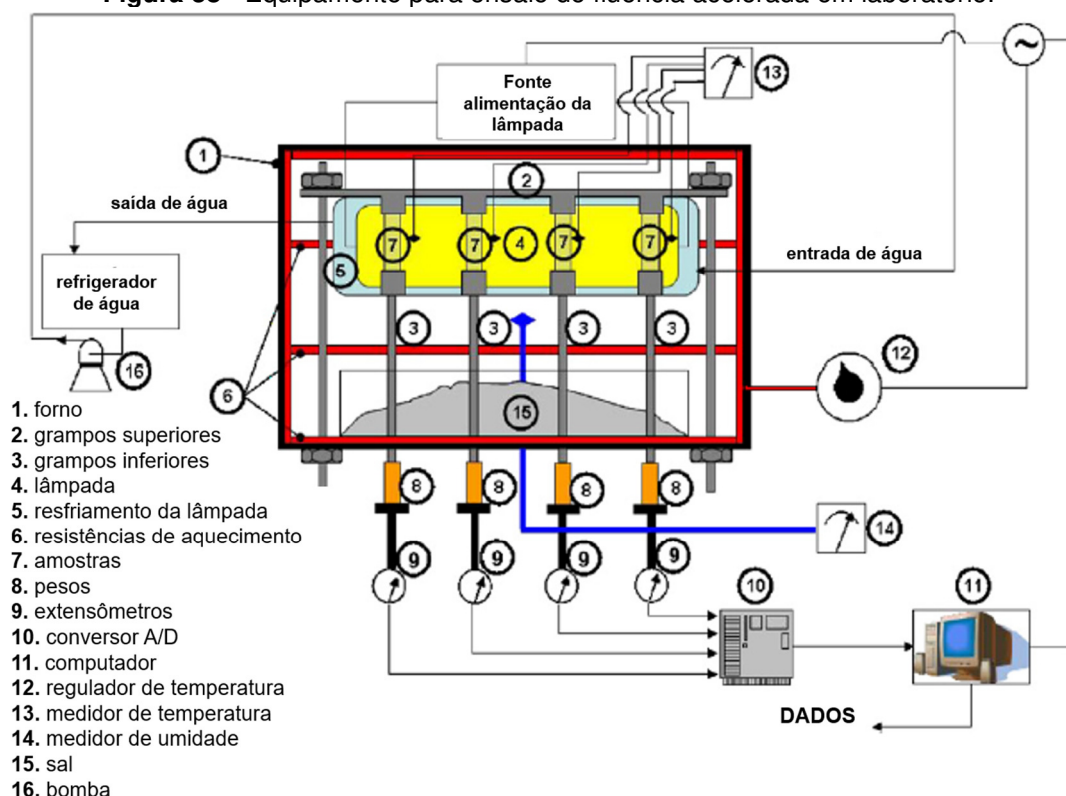
Figura 37 - Ensaios de fluência à tração em geogrelhas de PEAD em cinco níveis de temperaturas.



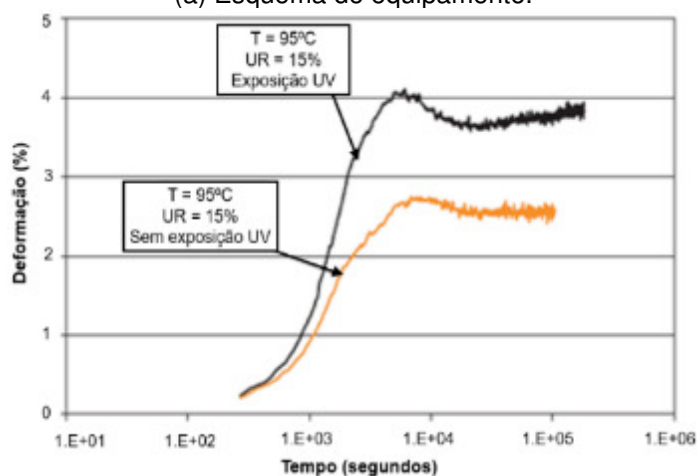
Fonte: Dobie, 2016.

Regel *et al.* (1967) realizaram estudos de fluência à tração em nove filmes poliméricos pelo uso de sistemas de alavancas, para manter a fluência constante, e com incidência de radiação UV por lâmpadas fluorescentes. Os autores verificaram que as quebras de ligações químicas pela radiação UV conduziram a aumentos bruscos nas taxas de fluência, cuja relação estreita causa a redução na sua vida útil. Ademais, ao se desligar a fonte de UV, ocorreram diminuições nas taxas de fluência até o valor inicial, ou seja, anterior à irradiação. Este efeito reversível é causado pela ação direta da radiação UV na amostra sob fluência e governada pela ruptura das ligações químicas.

Scaffaro, Dintcheva e La Mantia (2008) desenvolveram um equipamento para ensaios de fluência acelerada pela ação combinada de temperatura, umidade, radiação ultravioleta e fluência à tração (Figura 38). Resultados obtidos com poliamida (PA) indicaram a radiação UV como relevante fator de aceleração de deformações por fluência em consequência de alterações microestruturais observadas no polímero, como a diminuição do peso molecular por fotodegradação (Figura 38b).

Figura 38 - Equipamento para ensaio de fluência acelerada em laboratório.

(a) Esquema do equipamento.



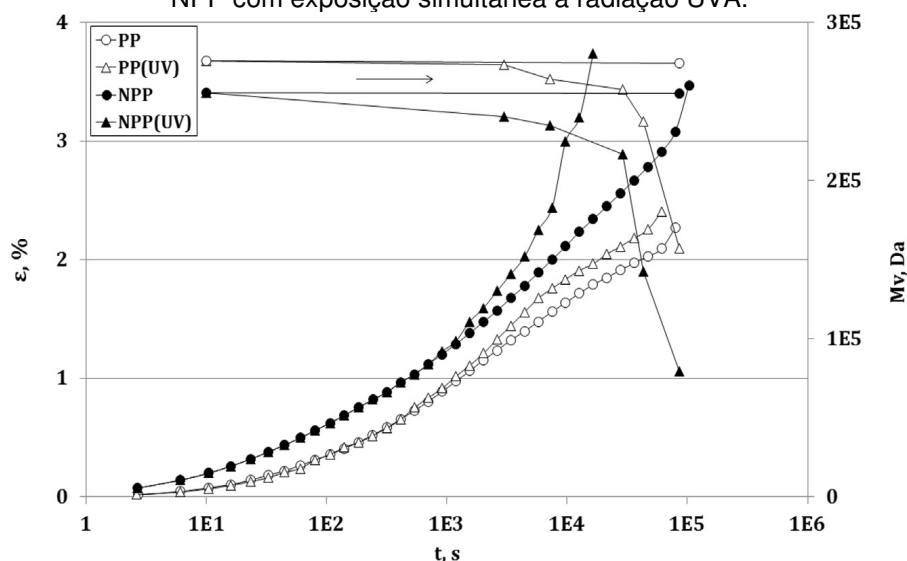
(b) Curvas de fluência para poliamida (PA) submetida a 15% de umidade relativa, temperatura de 95°C e exposição a radiação UV.

Fonte: Scaffaro; Dintcheva; La Mantia, 2008. Adaptada pela autora.

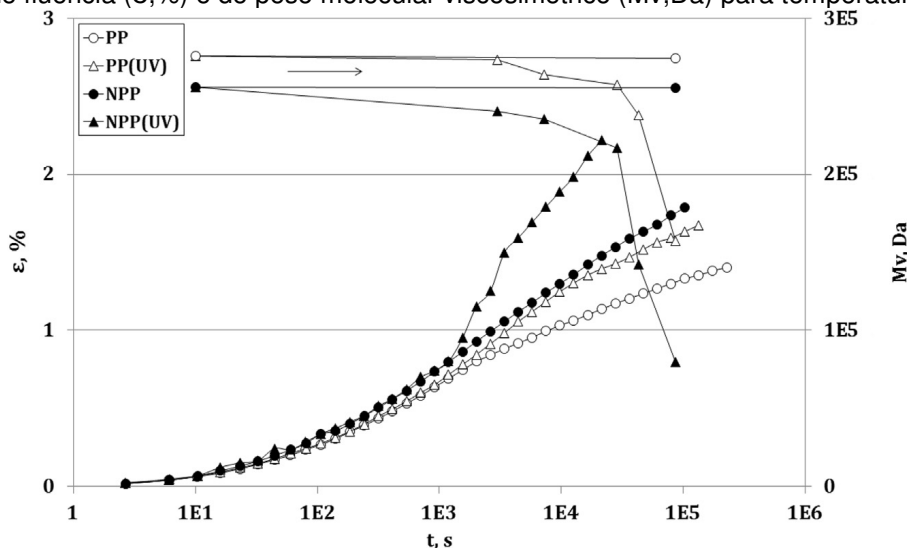
La Mantia *et al.* (2016) publicaram resultados com o emprego do equipamento supracitado (Figura 38) com amostras de matriz polimérica de polipropileno (PP) e de nanocompósito polimérico do tipo polipropileno/argila organomodificada (NPP) a carga de fluência de 3,5 MPa em duas temperaturas (80°C e 100°C), com e sem exposição à radiação UVA (Figura 39). Os autores observaram o aumento da deformação por fluência (ϵ ,%) para maiores tempos de exposição à radiação UVA e maior temperatura (100°C) em ambas as amostras ensaiadas (PP e NPP), bem como a notável diminuição do peso molecular viscosimétrico (M_v ,Da) apenas nas amostras

expostas simultaneamente à radiação UVA, com o decréscimo deste peso molecular iniciado junto ao aumento das taxas de deformação. Em todas as situações analisadas, as amostras NPP apresentaram maiores cinéticas de degradação por radiação UVA se comparado a matriz polimérica PP, que pode ser atribuído principalmente a presença de íons de ferro na argila usada (montmorilonita) e pela ocorrência da degradação da matriz polimérica (La Mantia *et al.*, 2016).

Figura 39 - Deformação por fluência acelerada em matriz polimérica PP e nanocompósito polimérico NPP com exposição simultânea a radiação UVA.



(a) Curva de fluência (ϵ , %) e de peso molecular viscosimétrico (Mv, Da) para temperatura de 100°C.



(b) Curva de fluência (ϵ , %) e de peso molecular viscosimétrico (Mv, Da) para temperatura de 80°C.

Fonte: La Mantia *et al.*, 2016. Adaptada pela autora.

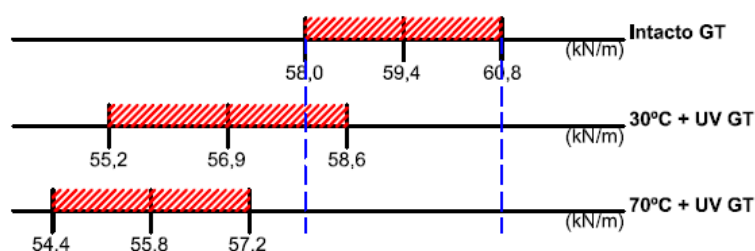
Urashima *et al.* (2018) realizaram ensaios de fluência à tração em geotêxtil tecido de polipropileno sob radiação UVA, temperatura e 15% de carga em pórticos que viabilizam avaliar os fatores de degradação isolados e simultaneamente (Figura 40a). A exposição à incidência de radiação UVA (irradiação total de 360 MJ/m²) em dois

níveis de temperatura (30°C e 70°C), ambos sem carregamento por fluência à tração, ocasionam perdas de resistências médias de 4,2% e 6,1%, respectivamente (Figura 40b). Ao avaliar tais fatores com a inclusão de 15% de fluência à tração, foram observadas perdas de 7,4% (radiação UVA + temperatura 30°C) e de 18,5% (radiação UVA + temperatura 70°C). Os referidos resultados evidenciaram a influência significativa da temperatura como fator de aceleração da degradação por fluência, além da ocorrência da sinergia entre os fatores analisados (Figura 40c).

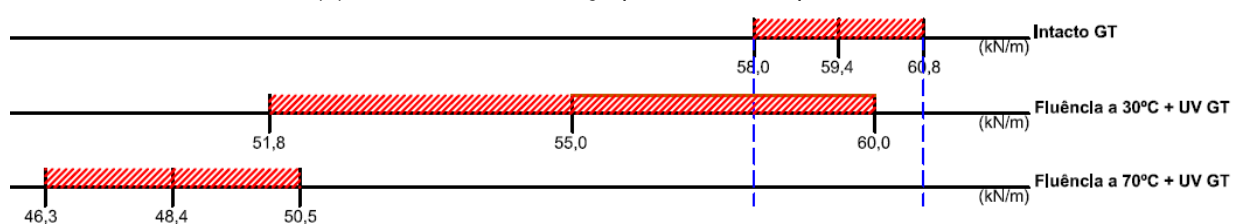
Figura 40 - Ensaios de sinergia de degradação de geossintéticos por fluência à tração.



(a) Pórticos para ensaios de fluência convencional e acelerada



(b) Intervalo de confiança por UVA e temperaturas.



(b) Intervalo de confiança por sinergismo de UVA, temperaturas e fluência à tração.

Fonte: Urashima *et al.*, 2018. Adaptada pela autora.

Portanto, a compreensão do comportamento sob fluência, associado ou não a outros fatores de degradação, é um dos importantes aspectos a ser considerado no dimensionamento de projetos com geossintéticos, principalmente em aplicações para tempo de vida de projeto mais longos (Costanzi *et al.*, 2003; Lopes; Lopes, 2010). Além disso, o comportamento de fluência à tração quer inferência multiescala, uma vez que depende de variáveis deste o nível de microestrutura, processos de fabricação e condições de uso e operação em campo.

A norma ISO/TR 20432 (2022) reporta que para considerar a incerteza (f_s) devido à extrapolação dos dados de ruptura por fluência em aplicação de solos reforçados, define-se uma razão (R_1) a ser adotado no dimensionamento, que pode ser obtido pela Equação 9 (ISO/TR 20432, 2022):

$$R_1 = 1,2^{r-1} \quad (9)$$

Dado que,

R_1 : relação que representa a incerteza devida à extrapolação;

$r = \log\left(\frac{t_D}{t_{máx}}\right)$, com valor mínimo de $1,0 \times t_{máx}$ referente à duração do maior tempo observado até a ruptura por fluência;

t_D : vida de projeto;

$t_{máx}$: maior tempo observado até à ruptura por fluência (em horas).

Por último, Koerner (2005) reporta valores de fatores de redução para fluência em geotêxteis apresentados na literatura (Tabela 7), o qual sugere a sua aplicação com cautela devido a necessidade de avaliações específicas que considere as condições de uso e solicitação particulares às distintas aplicações, assim como relativamente conservadores.

Tabela 7 - Fatores de redução de geotêxteis sob deformações por fluência.

Geotêxtil [Tipo de fibra ou fio]	den Hoedt (1986)	Lawson (1986)	Task Force (1991)	Koerner (1993)
Polipropileno	4,0	2,5 - 5,0	5,0	3,0 - 4,0
Polietileno	4,0	2,5 - 5,0	5,0	3,0 - 4,0
Poliamida	2,5	1,5 - 2,5	2,9	2,0 - 2,5
Poliéster	2,0	1,5 - 2,5	2,5	2,0 - 2,5

Fonte: Koerner, 2005. Adaptada pela autora.

3 MODELOS PROBABILÍSTICOS E FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA AVALIAÇÕES DE DURABILIDADE E CONFIABILIDADE

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os métodos atualmente existentes para avaliação da durabilidade dos geossintéticos são baseados em ensaios normatizados, os quais podem ser acelerados ou não, de modo a ponderar acerca de mudanças nas propriedades de interesse (Lopes; Lopes, 2010). Estas são realizadas mediante comparação das propriedades do material intacto com as do material degradado, por exemplo, em termos de propriedades físicas e mecânicas.

Como tratado anteriormente, para avaliação da degradação de geossintéticos por intemperismo ou por fluência à tração, realizam-se ensaios acelerados ou de campo, em função dos objetivos da análise, tempo e recursos disponíveis, dentre outros.

Os ensaios de degradação acelerada são aqueles em que há aumento na intensidade do agente (também denominado de fator de estresse) em situações controladas de laboratório, com a obtenção de resultados do material em diferentes níveis ao final do tempo de ensaio.

Define-se fator de estresse como aquele que é utilizado em ensaios de degradação acelerado em níveis mais elevados em relação às condições normais de uso, de modo a encurtar o tempo de vida de projeto do material pela diminuição ou degradação do seu desempenho (Freitas; Colosimo, 1997), tais como: vibração, temperatura, umidade, cargas (ou tensão), pressão, abrasão, elementos climáticos como radiação ultravioleta, fluidos químicos, dentre outros.

Em ensaios de vida acelerados a resposta de interesse é o tempo até a ocorrência da degradação final (falha catastrófica do material) ou a redução da propriedade avaliada do material até um nível permitido de uso (Freitas; Colosimo, 1997). Neste caso, a principal diferença entre ensaio de degradação acelerado e ensaio de vida acelerado é que no primeiro caso observa-se a degradação do material ao longo do tempo. Já no ensaio de vida acelerado, o resultado de interesse é o tempo necessário para que ocorra um certo nível de degradação.

Em contrapartida, há também a ponderação da durabilidade por ensaios em condições normais de uso ou operação. Neste caso, os parâmetros registrados podem ser modelados com ou sem um fator de estresse. No primeiro caso, a medida da degradação é uma função direta de um fator de estresse definido. Em modelos sem

fator de estresse definido, a confiabilidade (ou durabilidade) estimada é relacionada em um nível fixo de estresse (Gorjian *et al.*, 2009).

Antes da realização dos ensaios de degradação, acelerados ou normais, torna-se necessário especificar o nível limite de desempenho, denominado de limiar de degradação (D), ou seja, o índice de degradação aceitável (Gorjian *et al.*, 2009). Por exemplo, o percentual de perda de resistência mecânica em função da vida de serviço de projeto para o material. Deste modo, define-se a ocorrência da degradação se a variável resposta nos ensaios atingir o índice de degradação pré-especificado (D) ou mesmo a falha catastrófica do material (Freitas *et al.*, 2008; Gorjian *et al.*, 2009). A Figura 41a ilustra o comportamento geral de degradação $[W(t)]$ até D , parâmetro que também é avaliado em termos de confiabilidade (ver item 3.4). O tempo de falha (T) é definido como o período em que a trajetória de degradação ultrapassa o nível limite (D). Para ensaios de degradação natural, atribui-se t_s como o tempo planejado para a finalização do experimento.

Os resultados de degradação também podem ser usados em modelos de degradação para prognósticos subjacentes de durabilidade (ou análise de confiabilidade), a partir de modelos de degradação normal ou acelerados, como sumarizado na Figura 41b. A estimativa de confiabilidade baseada em modelos de degradação pode ser uma metodologia eficiente quando as observações são raras (Gorjian *et al.*, 2009). Tais modelos viabilizam análises que melhor se adequam a relação estresse-resposta, por exemplo, a relação entre desempenho, fator de estresse e seus níveis, bem como o tempo de vida (Nelson, 1990).

Figura 41 - Modelos de degradação para análises de confiabilidade.

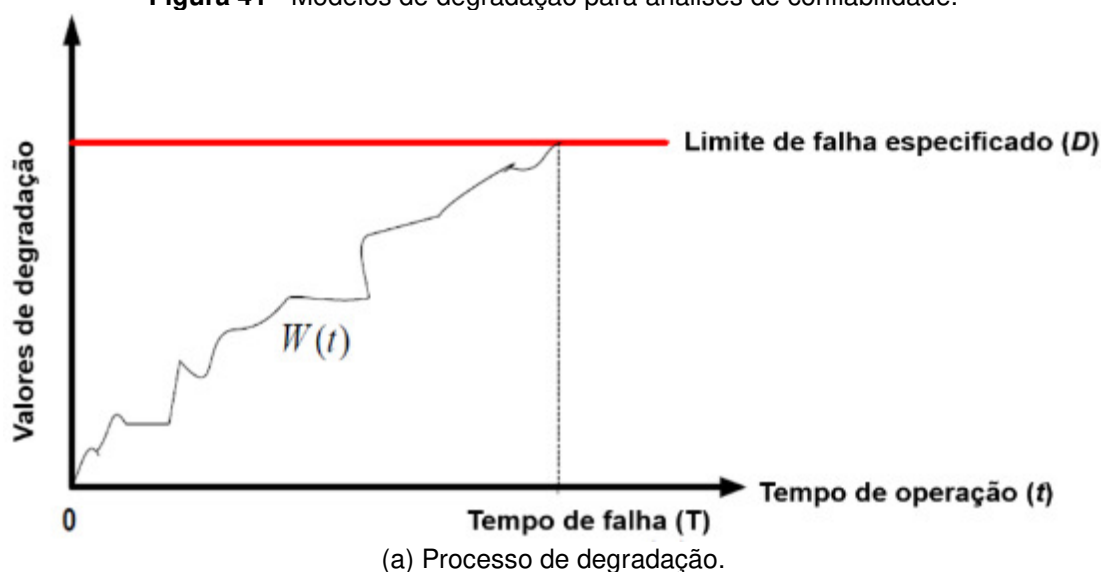
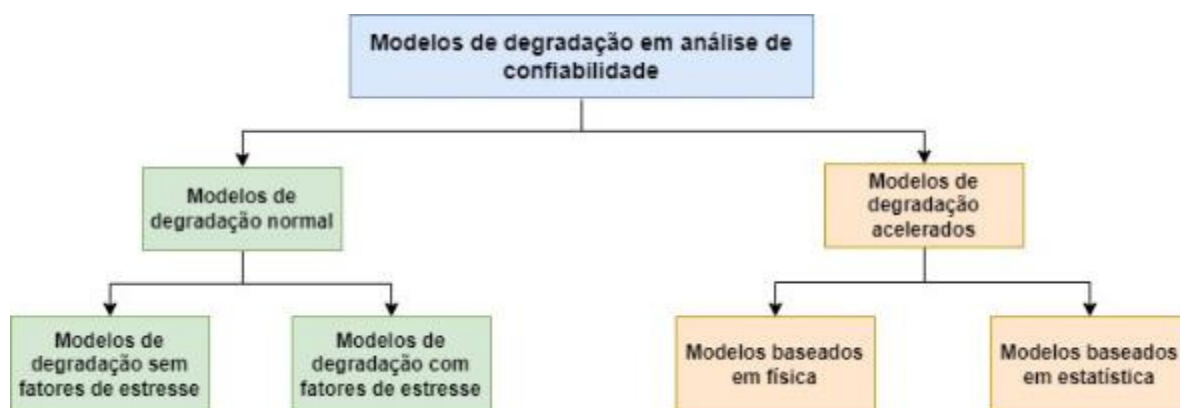


Figura 41 - Modelos de degradação para análises de confiabilidade (continuação).



(b) Classificação dos modelos de degradação para análise de confiabilidade.

Fonte: Gorjian *et al.*, 2009. Adaptada pela autora.

3.2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ANÁLISE DE DURABILIDADE

3.2.1 Introdução

Antes da apresentação de alguns modelos e ferramentas estatísticas para a ponderação de durabilidade, é importante ressaltar que na matemática existe a diferenciação entre dois grupos de modelos, em função da variabilidade dos resultados obtidos.

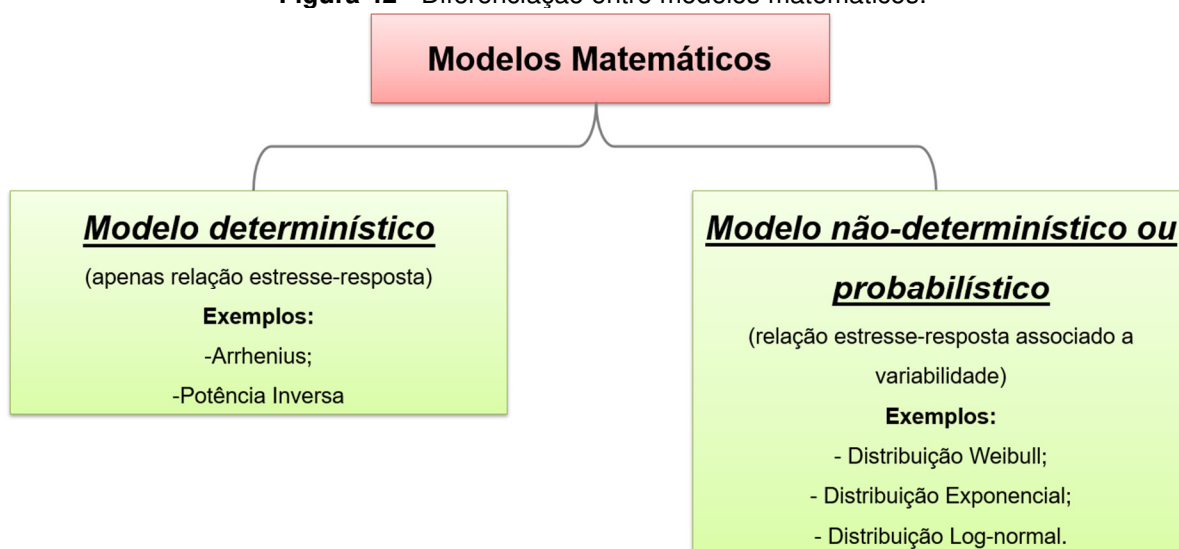
Em termos gerais, para alguns experimentos normatizados ou não, que ao serem replicados com o uso das mesmas condições de ensaio e o mesmo material de teste, obtêm-se resultados que apresentam variabilidade (ou dispersão). Nestes casos, os dados obtidos podem se adequar a modelos capazes de absorver a variabilidade observada, denominados de **modelos probabilísticos ou não-determinísticos**. Em contrapartida, **modelos determinísticos** são aqueles em que, para um dado valor do fator estresse e seus níveis, obtêm-se um valor único para a variável resposta, ou seja, são modelos que apresentam algum significado físico, químico ou mecânico cujo resultado efetivo seja determinado a partir das condições do experimento (Freitas; Colosimo, 1997; Meyer, 2012), exemplificado na Figura 42.

Outro conceito importante é de variável resposta, que é o resultado obtido a partir de ensaios de degradação (acelerado ou não), ou seja, é a resposta de interesse do estudo. Tal variável resposta pode ser do tipo **qualitativo** (ou categórico ou de atributos), que apresenta característica não quantificável (não-numérico). Em contrapartida, tem-se a variável do tipo **quantitativo**, que são características quantificáveis (numéricos), classificadas como discretas ou contínuas (Triola, 2008):

- **variáveis discretas:** são aquelas que podem assumir apenas valores inteiros “enumeráveis”, comumente gerados a partir de processos de contagem;
- **variáveis contínuas (ou numéricos):** são aqueles obtidos por processos de medição e podem ser resultantes a partir de um intervalo de valores.

Para o presente trabalho, as variáveis respostas são do tipo **quantitativo contínuo**, os quais serão tratados principalmente em termos de parâmetros mecânicos (resistência à tração máxima e deformação à carga máxima).

Figura 42 - Diferenciação entre modelos matemáticos.



Fonte: Freitas; Colosimo, 1997. Adaptada pela autora.

Nos últimos anos, têm sido realizadas pesquisas com o intuito de se obter modelos ou funções densidade de probabilidade (fdp) que melhor se ajustam aos dados amostrais para a avaliação da durabilidade de distintos materiais de engenharia. Vários fatores influenciam na obtenção de modelos e fdp que melhor refletem o desempenho do material durante sua vida de projeto a partir de resultados experimentais, tais como o tipo de estresse (temperatura, umidade, tensão, voltagem, dentre outros), material e suas propriedades, metodologia de ensaio, fator de aceleração adotado, dentre outros. Algumas suposições gerais dos modelos de degradação são citadas na literatura (Nelson, 1990), tais como:

- considera-se que o processo de degradação não seja reversível, ou seja, há aumento do nível de degradação com o tempo. Deste modo, modelos de degradação não se aplicam a materiais ou propriedades que possam ter seu desempenho aumentado submetidos às variáveis de estresse;
- desconsidera-se possíveis alterações que possam ter ocorrido (ou degradação) nas amostras antes dos ensaios de degradação. Neste caso,

atenta-se para uma correta seleção das amostras, armazenamento e propriedades iniciais;

- normalmente modelos de degradação são únicos para cada relação estresse-resposta e tipo de material.

Para o último item acima, ressalta-se a importância dos efeitos de sinergia dos fatores de degradação e as complexidades envolvidas na ponderação dos efeitos separados e simultâneos. Estudos de degradação em laboratório realizados por Carneiro, Almeida e Lopes (2014) evidenciam que o comportamento de sinergia é de complexa análise das variáveis respostas, pelo fato de tais materiais apresentarem constituições poliméricas com distintos comportamentos, por exemplo, pela presença de íons metálicos em substâncias químicas que podem atuar como catalisadores de degradação, além da presença de aditivos (tipo e concentração).

Paralelamente, além do emprego de modelos determinísticos ou probabilísticos em testes de degradação, acelerados ou não, também é rotineiro o uso de distintas ferramentas estatísticas para uma melhor inferência acerca do comportamento de um material, produto ou sistema. Nesta temática, tais escolhas são pautadas principalmente em quão bem os dados se encaixam a estas situações, qual o seu comportamento, se os mesmos conduzem a extrapolações razoáveis de desempenho para além do intervalo de dados ensaiados, bem como se os mecanismos de falha obtidos ou escolhidos a partir de ensaios acelerados são os mesmos observados para as situações normais de uso (ASTM G 172, 2019). Embora alguns modelos sejam utilizados para determinados tipos de materiais e/ou processos de degradação (ou falha do produto), não se deve atribuir que um dado modelo probabilístico, por exemplo a relação log-normal, seja a melhor escolha universal para situações já empregadas (ASTM G 166, 2020).

Nos tópicos a seguir serão apresentados sucintamente alguns modelos probabilísticos e inferências estatísticas empregados na estimativa ou previsão de vida de projeto para materiais, produtos ou sistemas. Em alguns casos, citam-se aplicações na área de geossintéticos. Atenta-se que normas americanas (ASTM G 166, 2020; ASTM G 172, 2019) apresentam sugestões de modelos (determinísticos e probabilísticos) e ferramentas estatísticas que podem ser utilizados para análise de dados de degradação acelerados a diversos materiais. Uma abordagem sucinta sobre modelos determinísticos é apresentada no Apêndice B. Estes não são objeto de estudo deste trabalho.

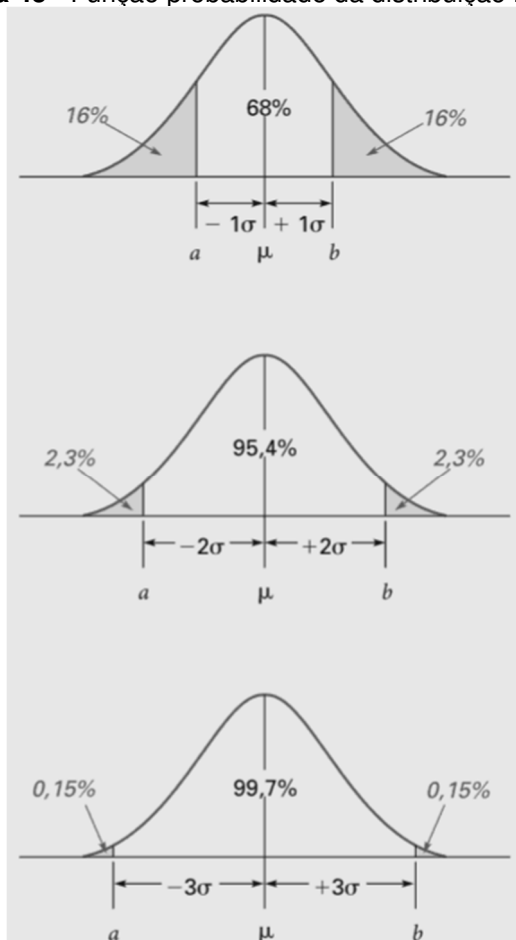
Não se pretende esgotar a discussão, mas sim apresentar alguns modelos existentes e suas possíveis aplicações nesta temática, a importância das ferramentas estatísticas como meio de inferir resultados e auxiliar na obtenção de modelos probabilísticos que explicam o comportamento dos materiais as diversas condições de solicitações de uso.

3.2.2 Modelos probabilísticos

3.2.2.1 Distribuição Gaussiano (ou Normal)

A distribuição Normal é utilizada para inferências de grandes amostras obtidas da população ($n > 30$) e apresenta-se como um gráfico de probabilidade simétrico em formato de sino, apresentado na Figura 43 e descrito pela Equação 10, em que os parâmetros associados são a média (μ) e desvio padrão (σ). Portanto, a distribuição Normal é uma distribuição de probabilidade normal com média $\mu = 0$, desvio padrão $\sigma = 1$, e área total sob a curva de densidade é 1 (Montgomery; Runger, 2012; Triola, 2008).

Figura 43 - Função probabilidade da distribuição Normal.



Fonte: Render; Stair Júnior; Hanna, 2010.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty \quad (10)$$

Dado que,

x = variável a ser medida em estudos experimentais;

μ = média populacional;

σ = desvio padrão populacional.

É a distribuição estatística em que dados amostrais são mais ajustados e, neste caso, considera-se que a média amostral ($\bar{x}$) é um bom estimador para a média populacional (μ) e que o desvio padrão amostral (s) é um bom estimador para o desvio padrão populacional (σ) (Triola, 2008).

A verificação se os dados amostrais se aderem à distribuição Normal é realizada mediante testes de aderência, tais como Kolmogorov-Smirnov, Qui-quadrado, Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, dentre outros.

3.2.2.2 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é comumente empregada para estudo de tempo de falha devido à fadiga de metais e tempo de vida de produtos industriais, tais como capacitores, dielétricos, componentes eletrônicos, modelagens de resistência à tração de materiais quebradiços como boro e carbono, dentre outros (Freitas; Colosimo, 1997; Ryan, 2009). A função de densidade é dada pela Equação 11 (Freitas; Colosimo, 1997; Ryan, 2009):

$$f(t) = \left(\frac{\delta}{\alpha^\delta}\right) t^{\delta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\delta\right], \quad t \geq 0 \quad (11)$$

Dado que,

t = tempo até ocorrência da falha;

δ = parâmetro de forma ($\delta > 0$; adimensional);

α = parâmetro de escala ($\alpha > 0$; mesma unidade de t).

Em termos de taxa de falha, a distribuição de Weibull apresenta a função dada pela Equação 12 e comportamento gráfico dado pela Figura 44, de modo que $h(t)$ é

crescente para $\delta > 1$, decrescente para $\delta < 1$ e constante para $\delta = 1$ (Freitas; Colosimo, 1997). Os parâmetros de forma (δ) e de escala (α) de Weibull podem ser obtidos pela realização de ensaios acelerados com temperaturas acima da temperatura de projeto do material, com a sua relação ao modelo de Arrhenius (ver Apêndice B em modelos determinísticos).

$$h(t) = \left(\frac{\delta}{\alpha}\right) \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\delta-1}, \quad t \geq 0 \quad (12)$$

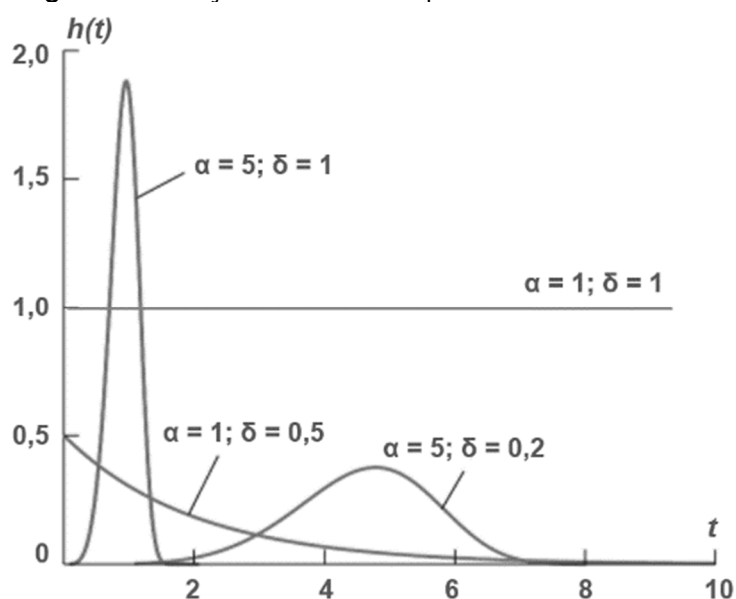
Dado que,

t = tempo até ocorrência da falha;

δ = parâmetro de forma ($\delta > 0$; adimensional);

α = parâmetro de escala ($\alpha > 0$; mesma unidade de t).

Figura 44 - Função densidade de probabilidade de Weibull.



Fonte: Navidi, 2012. Adaptada pela autora.

Yeon e Hsuan (2010) realizaram estudos de fluência em geogrelhas de politereftalato de etileno (PET) e polietileno de alta densidade (PEAD) em ensaios convencionais e acelerados, este último do tipo SIM que requer aumentos graduais de temperatura (ver item 2.4.2). Os autores propuseram um modelo de Weibull (Equação 13) para previsão de deformação por fluência de geogrelhas, obtidos por modelagem computacional. Os resultados viabilizaram a obtenção de fatores de redução e realização de previsões do comportamento de fluência para aplicações de

vida de projeto de até 100 anos a partir de dados laboratoriais obtidos em ensaios com duração de 10 horas (Yeon; Hsuan, 2010).

$$\varepsilon = K - \beta \left[\ln \left(b - e^{t/c} \right) - \ln \left(e^{t/c} - 1 \right) \right], \left(\ln(1) \leq \frac{t}{c} \leq \ln(b) \right) \quad (13)$$

Dado que,

ε = taxa de fluência (%);

t = log do tempo (h);

$K = \ln(\alpha)$, α = parâmetro de escala Weibull;

β = parâmetro de forma Weibull modificado ($= -\beta_0$);

b, c = parâmetros do modelo Weibull.

3.2.2.3 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é caracterizada por envolver uma função de taxa de falha constante, que é aplicada em casos de ocorrência de falhas aleatórias (Freitas; Colosimo, 1997). A função exponencial é indicada na Equação 14 e a função taxa de falha é apresentada na Equação 15, em que é possível visualizar a independência da taxa de falha com o tempo, t (Freitas; Colosimo, 1997; Ryan, 2009).

$$f(t) = \frac{1}{\alpha} \exp \left(-\frac{t}{\alpha} \right) \quad (14)$$

$$h(t) = \frac{1}{\alpha} \quad (15)$$

Dado que,

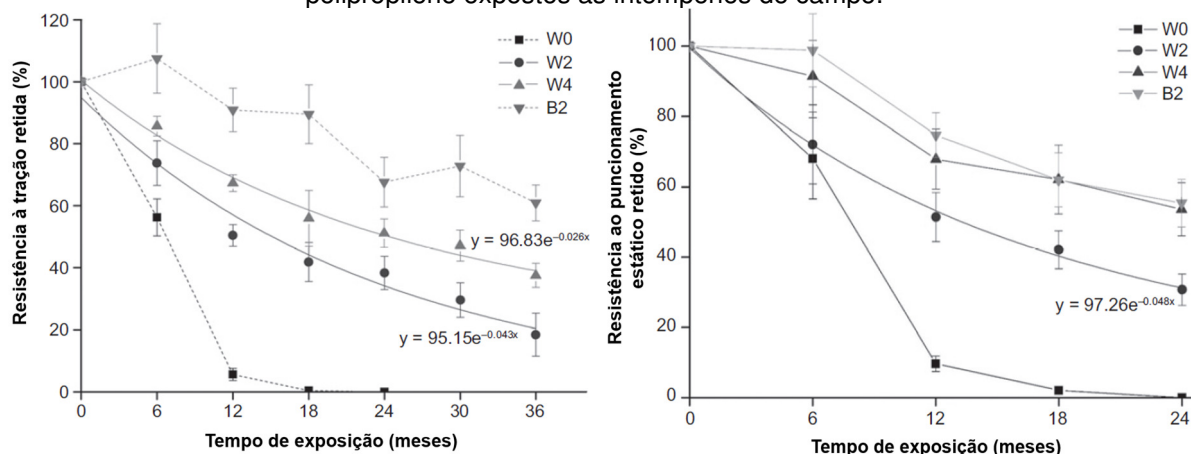
α = tempo médio de vida ($\alpha \geq 0$);

t = tempo de falha (este apresenta a mesma unidade que α).

Carneiro e Lopes (2017) avaliaram a durabilidade de geotêxteis não tecidos de polipropileno por intemperismo de campo durante 36 meses para quatro tipos de pacotes de aditivos químicos: W0 (ausência de aditivos); W2 (0,2% de HALS ou aminas estericamente bloqueadas); W4 (0,4% HALS); B2 (1,08% negro de fumo + 0,2% HALS). Como resultados, os autores obtiveram ajustes exponenciais para alguns dos resultados retidos de resistência à tração (Figura 45a) e resistência ao

puncionamento (Figura 45b) ao longo do tempo. Para os resultados que não apresentaram modelo exponencial, indicam-se a influência de mecanismos sinérgicos para os aditivos ao longo do tempo (Carneiro; Lopes, 2017). Portanto, os ajustes de resultados a modelos matemáticos auxiliam no entendimento dos complexos mecanismos de durabilidade dos geossintéticos.

Figura 45 - Influência de aditivos nas propriedades mecânicas de geotêxteis não tecidos de polipropileno expostos às intempéries de campo.



(a) Resistência à tração ao longo do tempo

(b) Resistência ao puncionamento estático ao longo do tempo

Fonte: Carneiro; Lopes, 2017. Adaptada pela autora

3.2.2.4 Distribuição Log-normal

A distribuição log-normal é comumente utilizada para análise de tempo de vida de projeto de componentes semi-condutores, nos quais os mecanismos de falha estão relacionados com interações químicas, tais como corrosão, acúmulo superficial de cargas elétricas, crescimento de fendas e fadiga dos materiais (ASTM G 172, 2019; Freitas; Colosimo, 1997; Ryan, 2009).

Na distribuição log-normal, o logaritmo natural da variável resposta de interesse apresenta uma distribuição Normal (Ryan, 2009). Deste modo, resultados provenientes desta distribuição podem ser ponderados a partir da distribuição probabilística Normal ao aplicar-se o logaritmo natural nos resultados ao invés de seus respectivos valores originais (Freitas; Colosimo, 1997). A função log-normal é indicada na Equação 16 (Freitas; Colosimo, 1997).

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(t) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (16)$$

Dado que,

μ = média do logaritmo do tempo de falha do material;

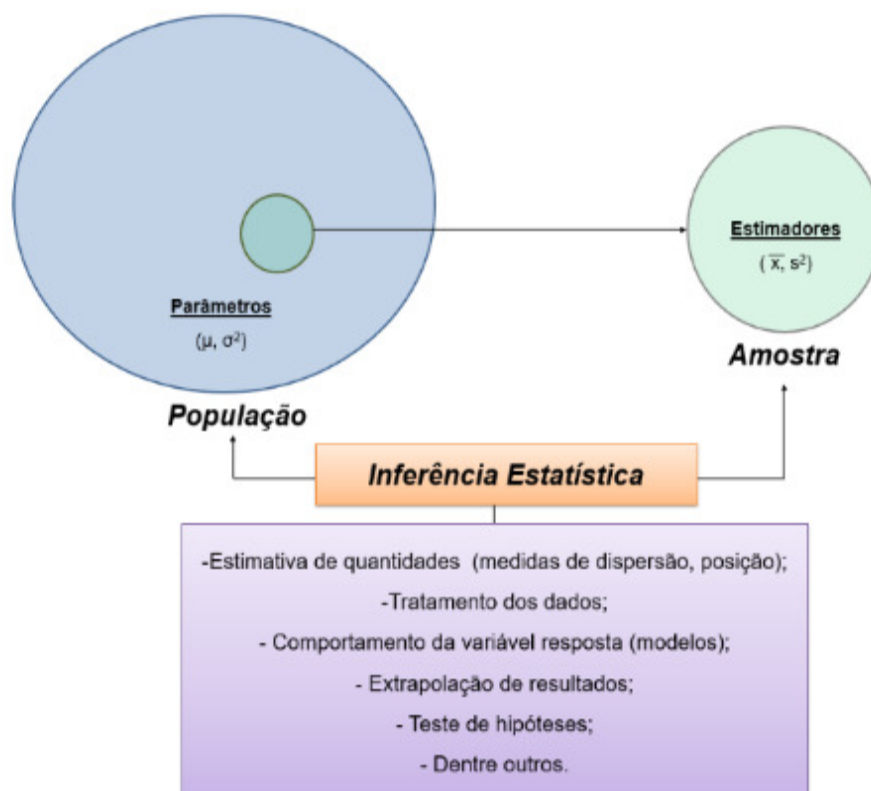
σ = desvio padrão.

3.3 INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS DA VARIÁVEL RESPOSTA

3.3.1 Considerações iniciais

Na literatura, encontram-se disponíveis uma relação de ferramentas estatísticas para análises de uma população a partir de resultados amostrais obtidos em ensaios experimentais planejados. Uma **população** é dita como a coleção completa de todos os elementos a serem estudados. Em termos práticos, estuda-se uma parte representativa dos elementos pertencentes à população de interesse para a realização de inferências acerca da população. Esta parcela é denominada de **amostra** (Montgomery; Runger, 2012). A Figura 46 ilustra a realização de inferência estatística.

Figura 46 - Inferência estatística sobre a população a partir de dados amostrais.



Fonte: a autora.

As variáveis respostas quantitativas, no caso deste trabalho do tipo variáveis contínuas (ver item 3.2.1), são inicialmente analisados por inferências de posição e de dispersão, tais como:

- medidas de posição: média, moda, mediana, percentis, quartis;
- medidas de dispersão: amplitudes, variância, desvio padrão, coeficiente de variação.

Para as variáveis aleatórias contínuas, tem-se:

“Diz-se que X é uma variável aleatória contínua, se existir uma função f , denominada função densidade de probabilidade (fdp) de X que satisfaça às seguintes condições:

(a) $f(x) \geq 0$ para todo x

(b) $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$

(c) para a, b , com $-\infty < a < b < +\infty$, teremos $P(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx$ ”

(Meyer, 2012, p. 81)

Os modelos probabilísticos para a estimativa ou previsão de vida de projeto de materiais, que melhor se aderem aos resultados amostrais, são exemplos de função de densidade de probabilidade (fdp). A seguir, serão sucintamente apresentados algumas das principais ferramentas estatísticas utilizadas para a realização de inferências acerca de variáveis respostas obtidas por planejamento experimental para avaliação da durabilidade de materiais.

3.3.2 Análise de variância (ANOVA)

A Análise de variância (ANOVA) é uma ferramenta de grande importância na inferência estatística utilizada para avaliar, por exemplo, se um determinado fator de análise (ou estresse) e seus níveis provocam comportamentos semelhantes ou não em termos da variável resposta de interesse⁶. Por exemplo, para situações de intemperismo acelerado, é possível verificar se a radiação ultravioleta (fator de estresse) em diferentes níveis de irradiância (W/m^2) acarretam perdas de resistência mecânica similares ou não a partir de resultados com réplicas experimentais.

⁶ Ressalta-se que a ANOVA é aplicável a fatores de estresse obtidos em ensaios de laboratório, com o intuito de inferir a respeito da influência da dinâmica climática em termos de fatores isoladamente, tais como níveis de incidências de radiação UV, temperatura média, umidade relativa do ar média e precipitação total acumulada, uma vez que há a fixação dos fatores e seus níveis. Portanto, a ANOVA não foi empregada neste trabalho com o propósito de se obter modelos estatísticos em função de fatores separadamente, pois foram realizados ensaios de durabilidade em campo, ou seja, sob dinâmica climática registrada, que não é constante, e a fixação de carga de fluência à tração.

Para esta ponderação, pode ser empregado o modelo linear estatístico (Equação 17) para a análise das variáveis respostas a partir de observações obtidas.

$$y_{ij} = \mu + \beta_i + \varepsilon_{ij} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = \text{número de níveis do fator} \\ j = \text{número de réplicas experimentais} \end{array} \right. \quad (17)$$

Dado que,

y_{ij} = variável aleatória da ij -ésima observação;

μ = valor médio da variável resposta;

β = fator de estresse (por exemplo, radiação ultravioleta);

ε = erro aleatório, considerado normal e independentemente distribuído com média zero e variância constante σ^2 [NID(0, σ^2)].

Além disso, a ANOVA parte do pressuposto de se estabelecer hipótese nula, H_0 (Equação 18) e hipótese alternativa, H_1 (Equação 19) para testar a igualdade entre as médias dos tratamentos para o fator de estresse, como indicado abaixo:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 \quad (18)$$

$$H_1: \tau_1 \neq \tau_2 \quad (19)$$

Dado que,

τ = valor médio da variável resposta.

A hipótese nula (H_0) será rejeitada se (Equação 20):

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, a(n-1)} \quad (20)$$

Dado que,

F_0 = Teste F (ANOVA);

α = nível de significância (normalmente de 5%);

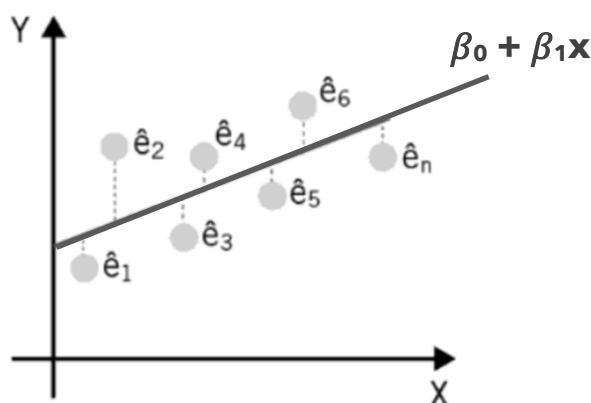
a = número de níveis do fator de estresse;

n = número de réplicas experimentais.

3.3.3 Regressão linear

A regressão linear é o ajuste de um conjunto de dados experimentais a uma reta, com a obtenção de modelo linear pela estimativa de seus parâmetros (Ryan, 2009), como ilustrado na Figura 47. O modelo de regressão linear pode ser escrito pela Equação 21 (Montgomery; Runger, 2012):

Figura 47 - Representação da regressão linear.



Fonte: Maia, 2017. Adaptada pela autora

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (21)$$

Dado que,

y = variável resposta;

β = parâmetros ou coeficiente da regressão de k variáveis;

ε = erro aleatório.

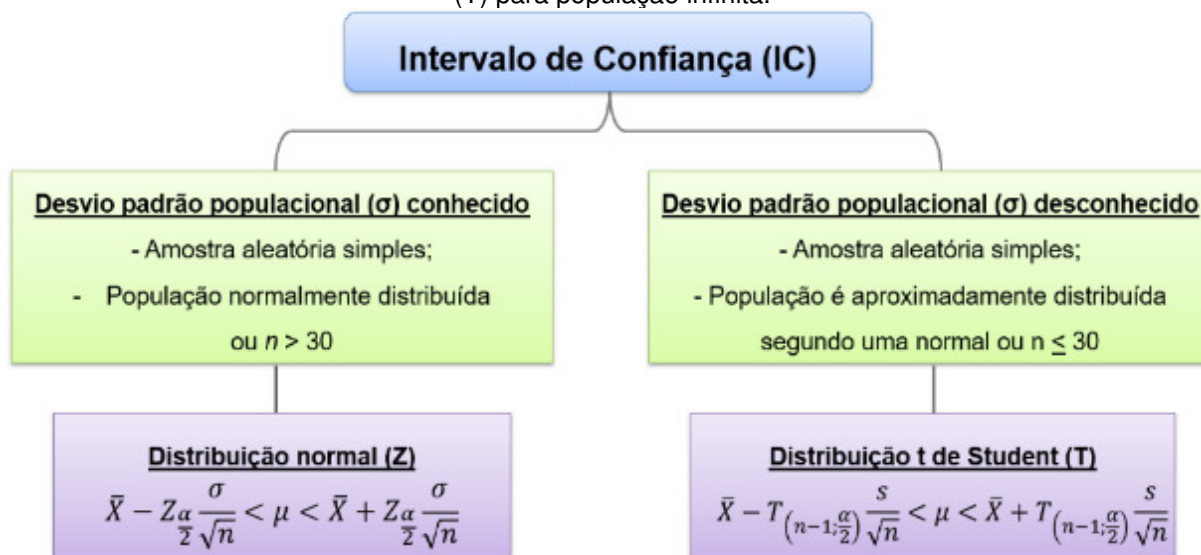
A estimativa dos parâmetros do modelo de regressão linear (Equação 21) pode ser realizada pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), que consiste em minimizar diferenças entre valores observados e valores estimados, ou seja, a parcela atribuída ao erro (ε) (Montgomery; Runger, 2012). Também é possível a aplicação de regressão não-linear para obtenção de uma relação matemática que explique o comportamento de um conjunto de dados, ou seja, os dados experimentais são ajustados em uma equação não-linear. Alguns exemplos são apresentados em 3.5.

3.3.4 Intervalos de confiança (IC)

Conceitualmente, o intervalo de confiança (IC) é uma faixa (ou intervalo) de valores que tem certa probabilidade de conter no seu interior o verdadeiro valor do parâmetro populacional em análise (Montgomery; Runger, 2012). Para tanto, é necessário associar um nível de confiança a esta faixa intervalar, o qual se remete a probabilidade $(1 - \alpha)$ que o IC realmente contém o parâmetro populacional, pela suposição que o processo seja repetido muitas vezes. De acordo com Triola (2008), o nível de confiança de 95% (com nível de significância $\alpha = 5\%$) é a escolha mais reportada, uma vez que resulta em um bom equilíbrio entre precisão (refletido na largura do intervalo de confiança) e confiabilidade (expresso pelo nível de confiança).

A construção de um intervalo de confiança avalia, inicialmente, se o desvio padrão populacional (σ) é conhecido e se a população é normalmente distribuída ou se o número corpos de prova, obtidos por amostragem aleatória, é $n > 30$. Após esta inferência, constrói-se o IC com a adoção do percentual de confiança e, também, com o cálculo da margem de erro (E) associada à estimativa da média populacional (μ). A Figura 48 apresenta critérios básicos para a construção de intervalos de confiança por métodos paramétricos.

Figura 48 - Construção de intervalos de confiança a partir das distribuições Normal (Z) e t de Student (T) para população infinita.



Fonte: a autora.

Referente a $Z_{\frac{\alpha}{2}}$ e $T_{(n-1; \frac{\alpha}{2})}$ mencionados na Figura 48, estes são tabelados e denominados de valor crítico para distribuição normal (Z) ou para t de Student (T), respectivamente, que se referem ao nível de confiança desejado a partir do grau de liberdade. O número de graus de liberdade ($n-1$) corresponde ao número de valores

amostrais (n) que podem variar depois que certas restrições tiverem sido impostas a estes dados (Triola, 2008).

A distribuição t de Student (Equação 22) aplica-se a pequenas amostras ($n < 30$) obtidas da população e no caso da variância da população (σ^2), ou desvio padrão populacional (σ), ser desconhecida.

$$T = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (22)$$

Dado que,

T = variável aleatória (neste trabalho tratado como variável resposta);

$\bar{x}$ = média amostral;

μ = média populacional;

s = desvio padrão amostral;

n = número de amostras (ou corpos de prova).

Em termos de função distribuição de probabilidade (fdp), a distribuição t de Student apresenta a mesma forma geral de sino que a distribuição Normal, todavia com distribuições mais largas para pequenas amostras. À medida que o tamanho amostral n se torna maior ($n > 30$), a distribuição t de Student se aproxima da distribuição Normal (Montgomery; Runger, 2012; Triola, 2008).

Inferências estatísticas por IC para a degradação de geotêxteis por fatores químicos e intemperismo acelerado foram realizados por Guimarães *et al.* (2012) e Guimarães *et al.* (2015), respectivamente, bem como em estudos de durabilidade por sinergismo entre fluência à tração, radiação UVA e temperatura por Guimarães *et al.* (2018), conforme Figura 40. Análises por esta ferramenta estatística também foram realizadas por Diericks e Berghe (2004) em estudos de durabilidade de agro-geotêxteis por intemperismo de campo.

3.4 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

Uma ferramenta estatística que tem sido bastante utilizada na análise de desempenho de um produto, material ou um sistema, em função de um tempo de projeto é a análise de confiabilidade.

Em termos gerais, a análise de confiabilidade objetiva ponderar, por meio de testes acelerados, se um produto, material ou sistema irá desempenhar suas funções durante o período estabelecido em projeto, como tempo de vida de projeto, cujos resultados são analisados por funções de distribuições de probabilidade (Carey; Koenig, 1991; Freitas; Colosimo, 1997; Freitas *et al.*, 2008; Nelson, 1990; Pizzolato, 2002; Ryan, 2009).

A função de confiabilidade (Equação 23) é reportada como a probabilidade de um produto desempenhar a sua função sem falhar até certo tempo t , dado por (Freitas; Colosimo, 1997; Meyer, 2012; Nelson, 1990):

$$S(t) = P(T > t) = 1 - F(t) \quad (23)$$

Dado que,

$S(t)$ = função de confiabilidade;

T = tempo até a ocorrência da falha;

$F(t)$ = probabilidade de falha.

Neste contexto, é necessário especificar o que é a falha de um material, produto ou sistema, que se caracteriza quando este deixa de funcionar por completo (conhecido como falha catastrófica) ou, nas situações de uso, atingir certo nível de perda de desempenho em intervalo inferior ao tempo de vida de projeto (Meyer, 2012; Nelson, 1990).

Conforme reportado na Figura 41a, os processos de degradação podem conduzir à redução do desempenho dos materiais até um limite previamente especificado (D). A análise de confiabilidade a partir de dados de degradação (normal ou acelerado, conforme Figura 41b) tornou-se uma abordagem relevante em inúmeros sistemas e projetos de engenharia. Gorjian *et al.* (2009) abordam que dados de degradação geralmente fornecem informações mais precisos em comparação ao tempo de falha na análise de confiabilidade e previsão de vida útil remanescente, além de alguns mecanismos de falhas poderem ser atribuídos a processos de degradação subjacentes.

Para estudos de durabilidade de geossintéticos, uma correlação de falha pode ser realizada ao se especificar qual o percentual de resistência retida nestes materiais após a realização de ensaios de degradação. Por exemplo, alguns autores

estabeleceram como critério de análise o parâmetro de meia-vida, correspondente a redução de 50% de propriedades mecânicas de interesse em relação aos valores dos produtos intactos (Brand; Pang, 1991; Greenwood; Curson, 2012; Koerner; Hsuan; Koerner, 2017). O referido critério é uma ferramenta importante para a estimativa da durabilidade em níveis aceitáveis, de modo que os geossintéticos não atingem perdas de propriedades que possam comprometer o desempenho de suas funções. Contudo, os critérios devem ser estabelecidos em função dos objetivos de cada investigação experimental, bem como de requisitos de projeto para manutenibilidade das propriedades requeridas dimensionadas para atender às propriedades requeridas.

Valores obtidos nos ensaios acelerados para análise de confiabilidade são considerados uma variável aleatória contínua que irão se adequar a um modelo com função densidade de probabilidade (fdp) em relação a um tempo de vida, T . Para tanto, é necessário definir qual o modelo probabilístico que melhor descreve o comportamento de falha para um dado material. Tais modelos se enquadram nas *Leis de Falhas* (Meyer, 2012). Os modelos de degradação também podem ser obtidos a partir de dados observados em ensaios de degradação natural, ou por condições normais de uso (Gorjian *et al.*, 2009). Para este último, destacam-se também os parâmetros obtidos por amostras exumadas de campo (ISO 13437, 2019), os quais são de suma importância para o entendimento dos complexos mecanismos de degradação, conforme abordado na justificativa desta pesquisa (Apêndice A).

De acordo com Freitas e Colosimo (1997), embora existam uma série de modelos probabilísticos, funções de densidade de probabilidade (fdp) dos tipos Normal, Log-normal, Exponencial e Weibull, reportados em itens anteriores, são os mais utilizados devido a comprovada adequação aos resultados amostrais para as diversas situações práticas. No Apêndice B serão apresentadas sucintamente estas principais leis de falhas.

3.5 MODELOS DE DEGRADAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

3.5.1 Degradação por intemperismo

A literatura apresenta alguns modelos matemáticos direcionados a materiais poliméricos que consideram a ação de radiação UV e temperatura, baseados em comportamentos lineares sem o efeito da temperatura (Equação 24) e com efeito da temperatura (Equação 25) ou, mais complexos, como lei da potência (Equação 26) ou

comportamento exponencial (Equação 27), listados os tópicos seguintes (Maxwell *et al.*, 2005):

- **Linear (sem efeito da temperatura):**

$$P = P_0 + b \cdot D \quad (24)$$

Dado que,

P_0 = propriedade inicial do material;

D = irradiância de ultravioleta;

b = constante a ser determinada para condições específicas de exposição.

- **Linear com o efeito da temperatura (relação com Arrhenius):**

$$P = P_0 + D e^{(-\Delta H/RT)} \quad (25)$$

Dado que,

P_0 = propriedade inicial do material;

D = irradiância de ultravioleta;

ΔH = energia de ativação;

R = constante de Boltzmann;

T = temperatura absoluta Kelvin.

- **Lei da Potência (sem efeito da temperatura):**

$$P = P_0 + b \cdot D^n \quad (26)$$

Dado que,

P_0 = propriedade inicial do material;

D = irradiância de ultravioleta;

b e n = constantes.

- **Exponencial (sem efeito da temperatura):**

$$P = P_0 + A \cdot e^D \quad (27)$$

Dado que,

P_0 = propriedade inicial do material;

A = constante;

D = irradiância de ultravioleta.

Para estudo da durabilidade de geossintéticos, Yang e Ding (2006) realizaram degradação de fibras de polipropileno por intemperismo natural (01/04/2002 a 31/03/2003 em Xangai, China) e intemperismo acelerado por lâmpadas de ultravioleta. Os níveis de radiação UV em laboratório foram controlados em função da quantidade de lâmpadas UV em funcionamento (2, 4 e 8 lâmpadas). Tais autores obtiveram um modelo por regressão não-linear que relaciona percentual de resistência mecânica residual em função da incidência de ultravioleta e de uma constante, como apresentado na Equação 28 e na Figura 49:

$$P = 100e^{-pX} \quad (28)$$

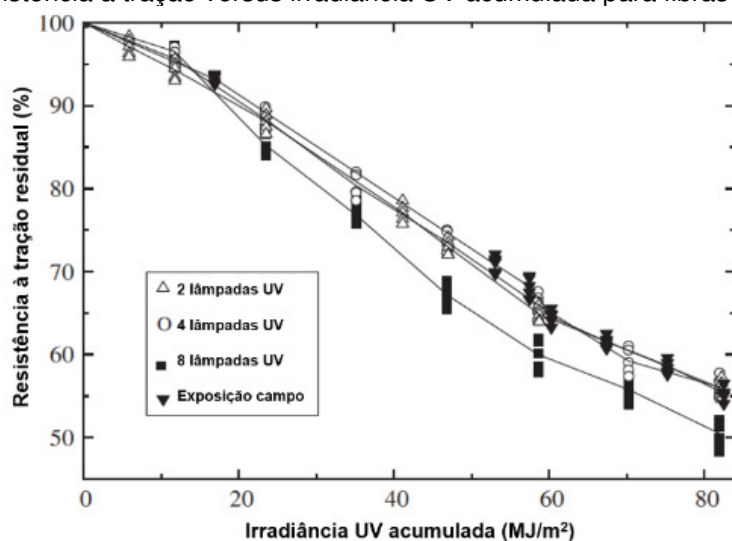
Dado que,

P = resistência à tração residual (%);

p = constante;

X = irradiância ultravioleta acumulada (MJ/m^2).

Figura 49 - Resistência à tração *versus* irradiância UV acumulada para fibras de polipropileno.



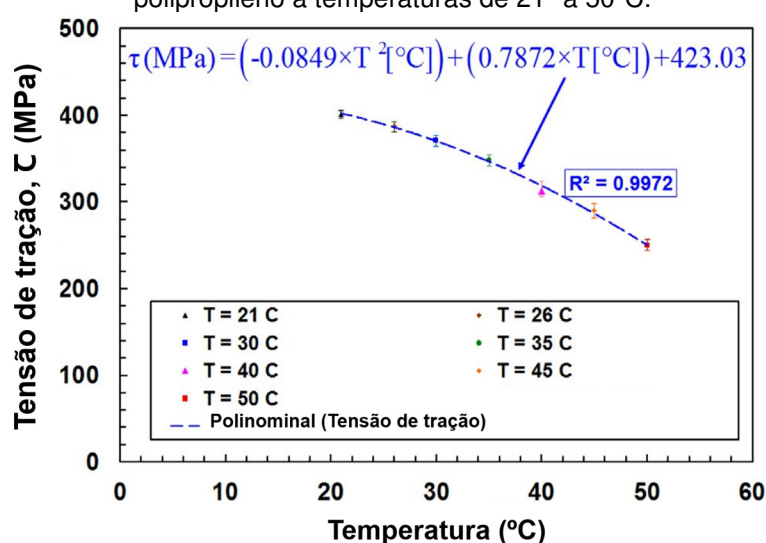
Fonte: Yang; Ding, 2006. Adaptada pela autora.

Valores da constante p (Equação 28) foram calculados para cada condição de teste, com a obtenção de (Yang; Ding, 2006): $p_1 = 0,0065$ (exposição em campo), p_2

= 0,0064 (ensaio acelerado com 2 e 4 lâmpadas UV) e $p_3 = 0,0075$ (ensaio acelerado com 8 lâmpadas UV). Mediante análises por ferramentas estatísticas, os autores salientam o cuidado no aumento da irradiância ultravioleta (MJ/m^2) em ensaios acelerados e a sua correlação pelo envelhecimento em campo.

Karademir e Frost (2014) realizaram a exposição de filamentos de geotêxtil não-tecido de polipropileno a temperaturas de 21° a 50°C e tracionados em DMA (Análise Térmica Dinâmico-Mecânica). Os autores obtiveram ajuste aos dados laboratoriais por regressão polinomial de 2ª ordem entre tensão de tração e temperatura (Figura 50).

Figura 50 - Resultado de regressão polinomial para filamentos de geotêxtil não-tecido de polipropileno a temperaturas de 21° a 50°C.



Fonte: Karademir; Frost, 2014. Adaptada pela autora.

Dierickx e Berghe (2004), a partir de pesquisas pela exposição de agro-geotêxteis tecidos de polietileno (PE) e politereftalato de etileno (PET) ao intemperismo de campo durante 5 anos, obtiveram um modelo linear-log (Equação 29) que se ajustou aos resultados de resistência à tração residuais obtidos ao longo do tempo, além de um modelo de potência (Equação 30) que se adequou bem aos resultados. Os autores também propuseram um modelo matemático que utiliza como parâmetro valores de deformação na ruptura (Equação 31).

$$T_s = a \cdot \ln(te) + b \quad (29)$$

Dado que,

T_s = resistência à tração (kN/m);

te = tempo de exposição (em anos);

a e b = coeficientes dependentes do tecido do agro-geotêxtil.

$$T_s = c(te)^d \quad (30)$$

Dado que,

T_s = resistência à tração (kN/m);

te = tempo de exposição (em anos);

c e d = coeficientes dependentes do tecido do agro-geotêxtil.

$$S_b = a_1 \cdot \ln(te) + b_1 \quad (31)$$

Dado que,

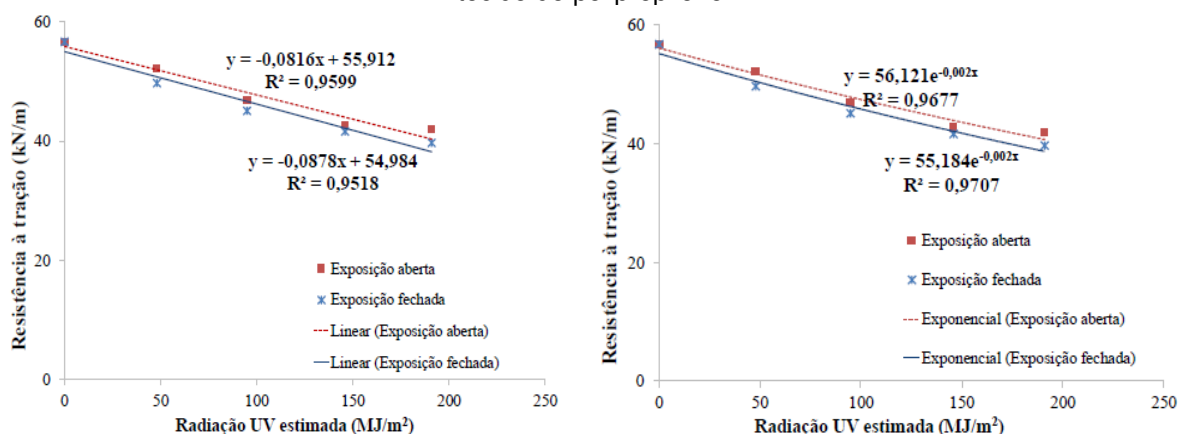
S_b = deformação de ruptura (%);

te = tempo de exposição (em anos);

a_1 e b_1 = coeficientes matemáticos dependentes do tecido do agro-geotêxtil.

Ensaio de intemperismo de campo realizados por Guimarães *et al.* (2020)⁷, apresentado na Figura 19, obtiveram modelos matemáticos linear e exponencial como ajustes aos parâmetros analisados na pesquisa. Observam-se que ambos os modelos (Figura 51) são em função de radiação UV estimada ao longo do período de exposição e resistência à tração máxima retida. Tais modelos são semelhantes a proposta apresentada por Maxwell *et al.* (2005).

Figura 51 - Modelos matemáticos para o comportamento de intemperismo de campo de geotêxtil tecido de polipropileno.



(a) Modelo matemático linear.

(b) Modelo matemático exponencial.

Fonte: Guimarães *et al.*, 2020.

⁷ Ensaio realizados no mesmo local de estudo desta pesquisa.

Zanzinger, Hangen e Alexiew (2010) destacam que a obtenção de modelos matemáticos por regressão linear (item 3.3.3) para estimativas de vida de serviço de projeto devem ponderar, de fato, a ocorrência da degradação dos materiais geossintéticos ao longo do tempo, cujas alterações nas propriedades dependem da temperatura ou de suas variações e, possivelmente, de condições ambientais.

3.5.2 Degradação por fluência à tração

Modelos de comportamento de materiais poliméricos por fluência à tração são considerados complexos por dependerem diretamente da matriz polimérica (cristalinos ou não-cristalinos) e seu comportamento viscoelástico, processos de fabricação, nível de carregamento por fluência, temperatura de ensaio, dentre outros, como abordado no tópico 2.4.

No caso de geossintéticos, ensaios normatizados são realizados para a obtenção das relações de deformação por fluência (%) e de ruptura por fluência (kN/m) por tempo, cujas curvas de deformação podem ser representadas por função logarítmica (apresentado anteriormente na Equação 5) e as de ruptura por fluência com ajustes por meio de análises de regressão (linear ou não-linear), conforme exemplificações anteriormente tratadas (ver item 2.4.2).

3.6 ADEQUAÇÃO DE MODELOS PROBABILÍSTICOS POR ANÁLISE DE RESÍDUOS

A partir da obtenção de um modelo probabilístico que melhor se ajusta aos dados experimentais, torna-se necessário verificar a sua adequação antes de quaisquer ponderações a serem realizadas pela aplicação deste modelo, ou seja, a validação das suas premissas para a credibilidade dos seus resultados (Freitas; Colosimo, 1997).

A análise básica para verificar a adequação de qualquer modelo é a realização da análise de resíduos. Entende-se como resíduo (e_{ij}) a diferença obtida entre a variável resposta observada e a variável resposta estimada (Montgomery; Runger, 2012), dado por (Equação 32):

$$e_{ij} = Y_{ij} - \hat{Y}_{ij} \quad (32)$$

Dado que,

Y_{ij} = variável resposta observada;

$\widehat{Y}_{ij}$ = variável resposta estimada.

Em outras palavras, a verificação dos resíduos apresentará uma indicação se para um conjunto de variáveis respostas (variável aleatória) existem possíveis afastamentos das suposições atribuídas ao modelo construído, bem como analisar a presença de quaisquer observações fora dos padrões previstos para o modelo em elaboração. Portanto, a análise de resíduos não objetiva indicar se certo modelo está correto, mas sim rejeitar modelos que contenha parâmetros correlacionados de modo inapropriado, bem como pressuposições inferidas ao modelo.

Para a análise de resíduos, é possível utilizar técnicas gráficas ou ferramentas estatísticas. O ideal é realizar os dois tipos de avaliações para tomadas de decisões necessárias para a adequação do modelo probabilístico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir da premissa de se estimar a durabilidade de geotêxteis pela ação simultânea de fluência à tração e intemperismo de campo, foi realizado um planejamento experimental com a realização de ensaios de durabilidade em campo, assim como fluência em laboratório.

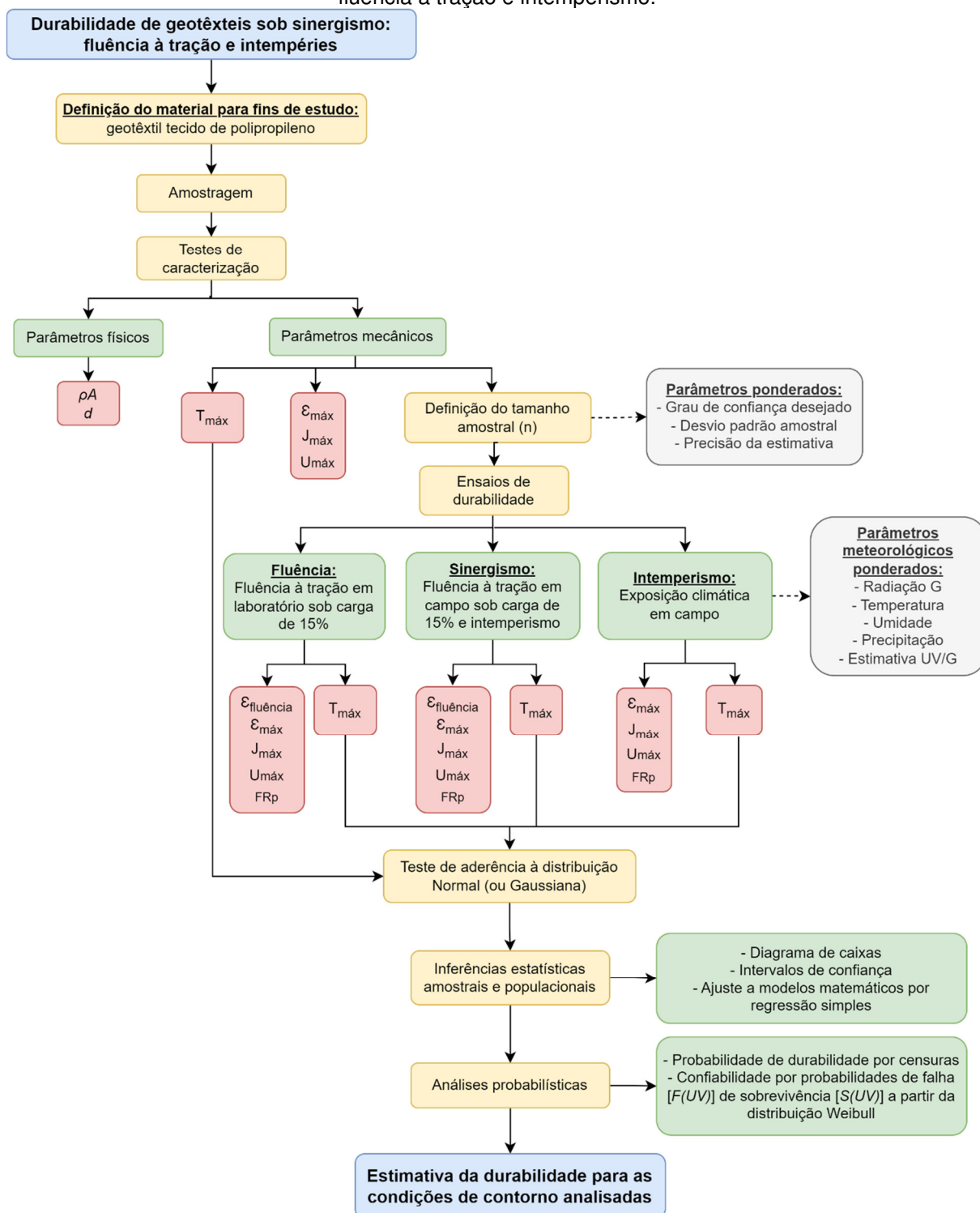
Para a estimativa da durabilidade por ferramentas estatísticas e probabilísticas, resultados de resistência à tração máxima retida (kN/m) e sua respectiva deformação (%) foram analisados com o intuito de se compreender os mecanismos de tais fatores de degradação para as condições experimentais em estudo. Isto contempla a influência da dinâmica climática (ou intemperismo) em períodos de exposição isolados por estações climáticas e acumulados, bem como efeitos por sinergismo entre fluência à tração e dinâmica climática. Ademais, os resultados experimentais foram analisados pelas seguintes hipóteses (Lopes; Lopes, 2010):

- como a solicitação mecânica de fluência à tração pode alterar os processos de degradação por intemperismo de campo;
- quanto a ocorrência de alterações nas propriedades do geossintético (ou seja, degradação) modifica o comportamento de fluência à tração.

Foi utilizado um geotêxtil tecido de polipropileno para fins de pesquisa, cuja metodologia de análise poderá ser aplicada a demais geotêxteis (GTX) e produtos correlatos aos geotêxteis (GTP), com a ponderação conjunta pelo tipo de matriz polimérica, as propriedades do material, além dos fatores e seus níveis, tais como cargas de fluência à tração, local, período e início das exposições por intempéries, dentre outros.

A Figura 52 apresenta o fluxograma com a sumarização das principais etapas experimentais, que engloba a caracterização física e mecânica do geotêxtil, a realização de ensaios de durabilidade em campo e em laboratório, a obtenção de parâmetros mecânicos após cada ensaio de durabilidade, os quais foram analisados por inferências estatísticas e probabilísticas. Os tópicos seguintes apresentam a descrição das etapas da pesquisa executada.

Figura 52 - Fluxograma para a estimativa da probabilidade de durabilidade de geossintéticos por fluência à tração e intemperismo.



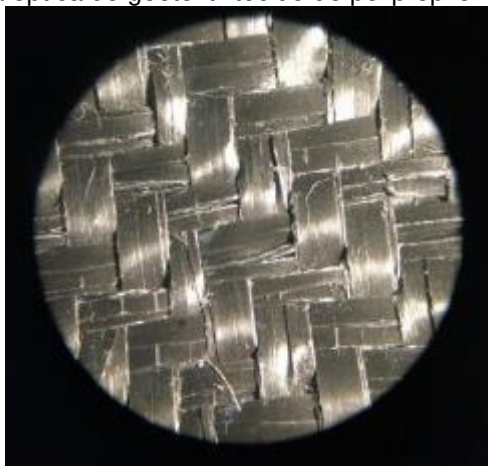
Fonte: a autora.

4.2 MATERIAL EMPREGADO NA PESQUISA

Foi empregado um geotêxtil tecido (GTX-W) de matriz polimérica de polipropileno, para fins de pesquisa. Esta escolha partiu-se de GTX-W ser empregado em distintas aplicações geotécnicas e ambientais sujeitas ao sinergismo por fluência à tração e

intemperismo, conforme reportado no item 2.1. Além disso, o polímero polipropileno corresponde a cerca de 90% dos geotêxteis comerciais (ISO/TS 13434, 2020; Koerner, 2012). A Figura 53 apresenta a sua imagem por microscopia óptica.

Figura 53 - Microscopia óptica do geotêxtil tecido de polipropileno com ampliação de 67x.



Fonte: a autora.

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

O geotêxtil tecido de polipropileno foi caracterizado por propriedades físicas e mecânicas. A amostragem única e representativa de corpos de prova para os ensaios foi realizada de acordo com a ABNT NBR ISO 9862 (2013).

A caracterização física de massa por unidade de área - ρ_A (ABNT NBR ISO 9864, 2013) é realizada com o uso de pelo menos 10 corpos de prova de superfícies iguais a $(100 \pm 1) \text{ cm}^2$, cujas massas são obtidas em balança com precisão de 0,001g (Figura 54), realizado no Laboratório de Geotecnia do CEFET/MG, Campus Varginha. Valores dimensionais de três medidas laterais de cada corpo de prova são obtidos com régua métrica.

A caracterização por espessura - d (ABNT NBR ISO 9863-1, 2021) em geotêxtil é realizada com aplicação de uma tensão de $(2 \pm 0,01) \text{ kPa}$ por uma sapata de carregamento de formato circular. A partir de um relógio comparador, é medida a distância entre a base do equipamento (ou placa de referência) sobre o qual o corpo de prova é posicionado e a face da sapata circular. A norma supracitada especifica a utilização de pelo menos 10 corpos de prova com dimensões limitadas no mínimo de 1,75 vezes o diâmetro da sapata e máximo da placa de referência. Foi adotado os mesmos corpos de prova do ensaio de massa por unidade de área e a obtenção de três medidas para cada corpo de prova. Este ensaio foi realizado no Laboratório de

Geossintéticos do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) que possui o equipamento apresentado na Figura 55.

Figura 54 - Caracterização de massa por unidade de área.



Fonte: a autora.

Figura 55 - Equipamento para caracterização de espessura.



Fonte: a autora.

A caracterização mecânica por resistência à tração máxima ($T_{\text{máx}}$) e deformação à carga máxima ($\epsilon_{\text{máx}}$) foi realizado a partir de ensaios de faixa estreita de acordo com a norma ASTM D 5035 (2019), que preconiza uso de corpos de prova com largura de 50 mm, distância entre garras de 75 mm e velocidade de tracionamento de 300 mm/min. A escolha de ensaio do tipo faixa estreita foi tomada, bem como a opção pela norma ASTM D 5035 (2019), em função do tamanho amostral para os ensaios de durabilidade por intemperismo de campo e de fluência à tração.

Corpos de prova menores permitem a obtenção de um maior número destes para a mesma amostra, cuja quantidade mínima a ser obtida considera a variabilidade estatística do material em estudo, assim como a precisão das estimativas a serem realizadas por inferências amostrais (ver subitem 4.4). Como os ensaios de tração do tipo faixa larga (ABNT NBR 10319, 2013) requerem corpos de prova com largura de

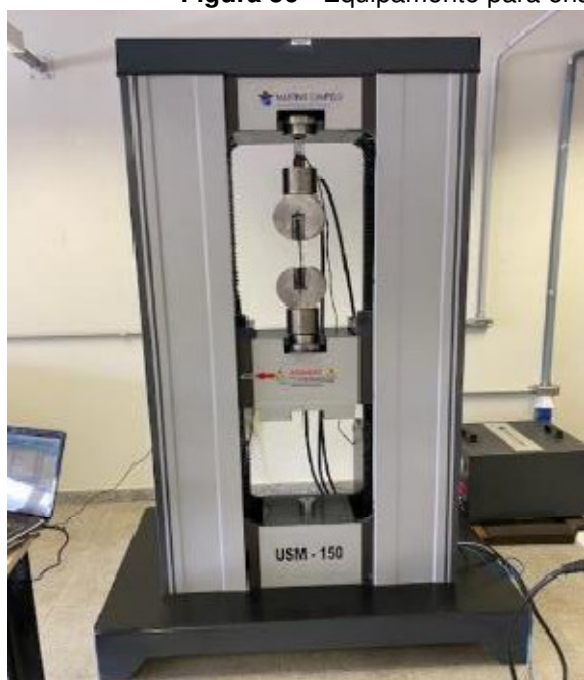
200 mm, distância entre garras de 100 mm e velocidade de tracionamento de 20 mm/min, tornaram a sua adoção inviável para ensaios de durabilidade.

Allen (2016) menciona a norma ASTM D 5035 (2019) para ensaios de durabilidade de geotêxteis, assim como o seu uso em demais publicações (Dias Filho *et al.*, 2019b; Guimarães *et al.*, 2017) pelo reconhecimento da semelhança entre os resultados obtidos pela norma supracitada em comparação a ensaios de faixa larga (ABNT NBR 10319, 2013). Em vista disso, tanto ensaios de caracterização do material intacto (valor de referência) quanto de corpos de prova extraídos das amostras expostas para todas as condições de degradação (Figura 52) são realizados com a mesma metodologia.

A Figura 56 apresenta a máquina mecânica universal microprocessada com capacidade de aplicação de força de até 150 kN utilizada nos ensaios, localizada no Laboratório de Geossintéticos do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Devido o comportamento anisotrópico de geotêxteis tecidos (Kazimierowicz-Frankowska, 2005; Perkins, 2000), a caracterização mecânica foi realizada nos sentidos longitudinal e transversal de fabricação. Como preconização normativa (ASTM D 5035, 2019), foi aplicada uma pré-carga de 0,5% da resistência à tração máxima esperada para a fixação dos corpos de prova na garra hidráulica (Figura 56b).

Figura 56 - Equipamento para ensaios mecânicos em geossintéticos.



(a) Visão geral equipamento.



(b) Dimensões do corpo-de-prova para faixa estreita e posicionamento na garra hidráulica.

Fonte: a autora.

Os cortes de corpos de prova para ensaios de resistência à tração foram realizados com uso de dispositivo de corte à quente (Figura 57) constituído de fio de cromo-níquel com passagem de corrente elétrica, uma vez que o corte à frio ocasiona perdas de filamentos dos corpos de prova.

Figura 57 - Corte à quente de corpos de prova para ensaio de resistência à tração.



Fonte: a autora.

4.4 CÁLCULO DO TAMANHO AMOSTRAL

A definição do número de corpos de prova a ser ensaiado em cada teste de durabilidade é uma das etapas mais importantes do planejamento experimental, cujo valor influencia diretamente na representatividade dos resultados amostrais, inferências populacionais e probabilísticas. Em regra, o tamanho amostral “n” depende de 3 fatores básicos:

- o grau de confiança desejado, definido por $100(1 - \alpha)\%$, dado α o nível de significância;
- dispersão entre a média amostral - $\bar{x}$ (ou valor esperado) e os valores individuais obtidos, conhecido como desvio padrão amostral (s);
- fixação do erro tolerável ou admitido (ϵ).

Nesta pesquisa, foi utilizada a formulação baseada em t de Student (Equação 33), por não se conhecer o valor do desvio padrão populacional e, também, por trabalhar com tamanho amostral - n (ou número de corpos de prova) pequeno ($n < 30$).

$$n \geq \left(\frac{t_{\alpha/2, n_0-1} * s}{e * \bar{x}} \right)^2 \quad (33)$$

Dado que,

$\bar{x}$ = média amostral;

s = desvio padrão amostral;

e = precisão da estimativa da média populacional;

$t_{\alpha/2, n_0-1}$ = valor crítico da distribuição t de Student.

A etapa inicial foi a realização da caracterização mecânica por ensaios de resistência à tração faixa estreita (ASTM D 5035, 2019) com amostragem inicial de corpos de prova igual a 10 ($n_0 = 10$). A partir dela, obteve-se média amostral ($\bar{x}$) e desvio padrão amostral (s), bem como valor crítico da distribuição t de Student ($t_{\alpha/2, n_0-1}$) igual a 2,262, para nível de confiança de 95%, referente a graus de liberdade igual a 9 ($n_0 - 1$). Posteriormente, foi aplicada a Equação 33, com a fixação de valores para precisão da estimativa (e).

4.5 ENSAIOS DE DURABILIDADE POR SINERGIA DE FLUÊNCIA À TRAÇÃO E INTEMPERISMO

4.5.1 Durabilidade por intemperismo de campo

Ensaio de durabilidade por intemperismo de campo foram realizados no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Varginha, situado ao Sul de Minas Gerais (-21,5490° Sul, -45,4194° Oeste, 925,00 m acima do nível do mar). Neste local há uma área experimental em torno de 240 m² para estudos de durabilidade de geossintéticos por intemperismo, estruturada de modo a não apresentar elementos que possam interferir nos parâmetros analisados, como árvores e edificações próximas que possam causar sombra sobre as estruturas metálicas, corredores de vento, baixos níveis de poluição atmosférica, dentre outros (ISO 877-1, 2009; ISO 877-2, 2009). Este último fator é particularmente relevante, pois poluentes como poeira, se depositados na superfície dos materiais, podem agir como barreira de luz solar sobre a superfície das amostras em exposição.

A Figura 58 apresenta o local de realização dos ensaios de intemperismo em campo, com indicação da localização da área de pesquisa, detalhada na Figura 59.

A cidade de Varginha (MG) apresenta um clima quente e temperado com temperatura média anual em torno de 20,0°C, média anual de pluviosidade de 1336

mm e classificação do clima, de acordo com Köppen e Geiger, do tipo Cwa, ou seja, clima subtropical de inverno seco e verão quente (Climate-Data.org, 2021).

Figura 58 - Imagem satélite do local de exposição dos geotêxteis ao intemperismo.



Fonte: Google Maps 2023 (Acesso em: 17 jul. 2023). Adaptada pela autora.

Figura 59 - Área de pesquisa para estudos de durabilidade de geossintéticos por intemperismo e fluência à tração em campo.



(a) Vista geral.

Fonte: a autora.

Figura 59 - Área de pesquisa para estudos de durabilidade de geossintéticos por intemperismo e fluência à tração em campo (continuação).



(b) Vista inferior.



(c) Vista superior.
Fonte: a autora.

A Figura 60 apresenta o comportamento climático da cidade de Varginha obtida na plataforma nacional *Projeteee* (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes) direcionada a soluções para projetos de edifícios com conforto bioclimático a partir de arquivos climáticos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) coletados no ano de 2016. Este conhecimento preliminar é de suma importância para a interpretação dos resultados de durabilidade que envolvem ação direta do intemperismo de campo.

Figura 60 - Comportamento climático mensal da cidade de Varginha, Minas Gerais.

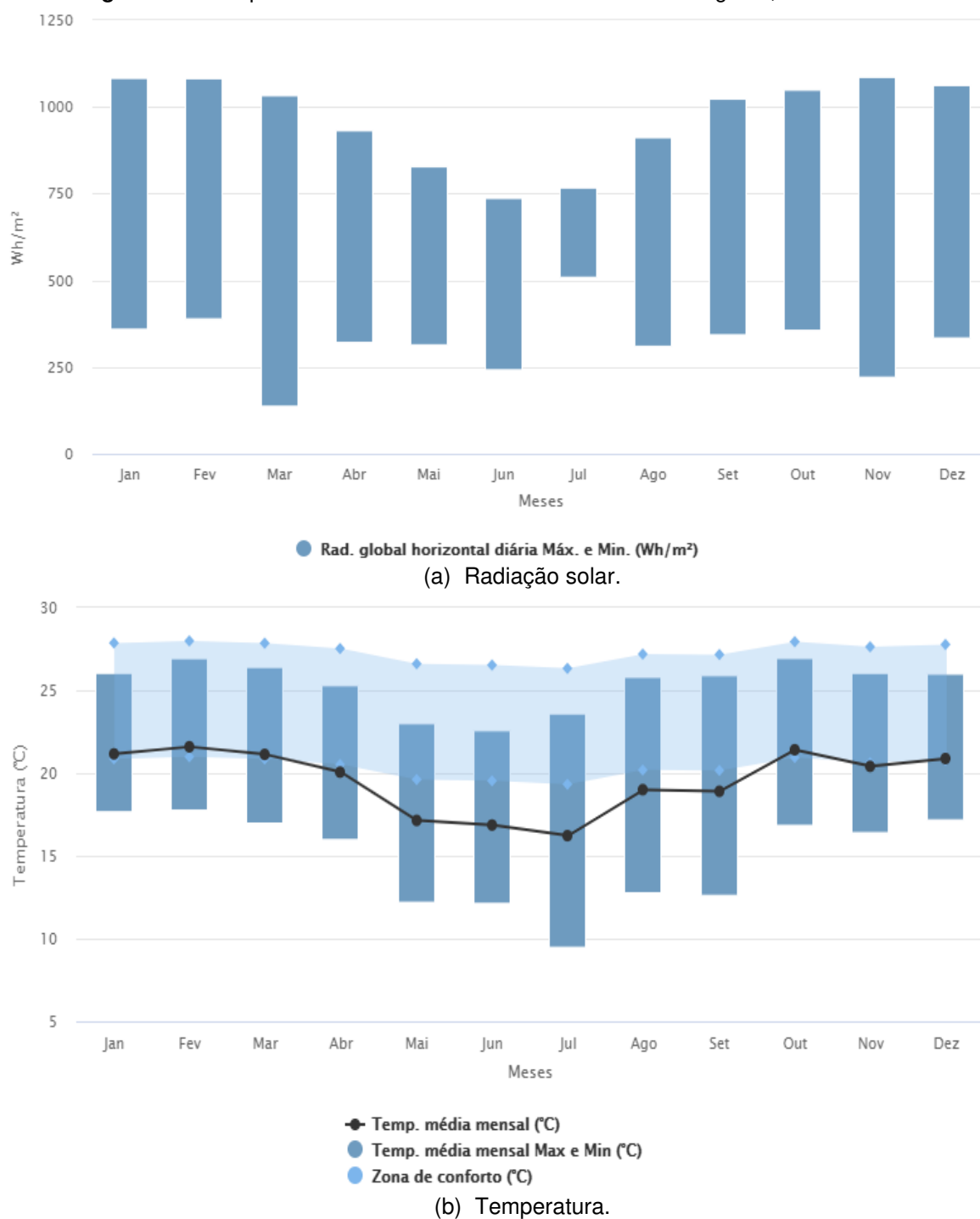
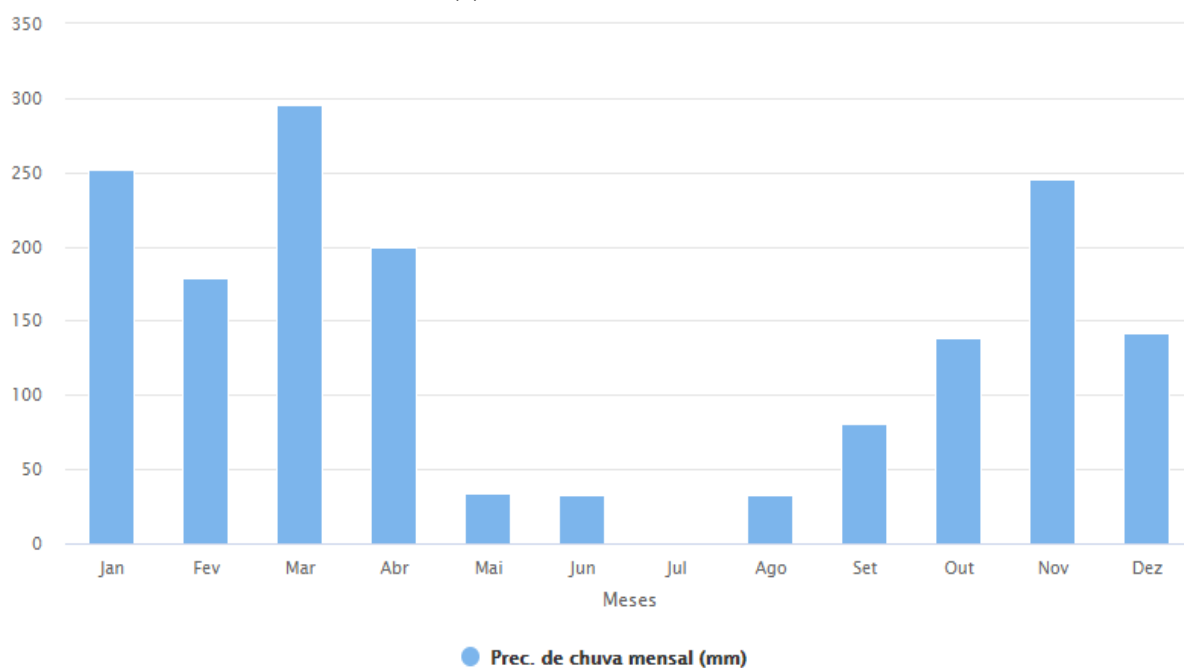


Figura 60 - Comportamento climático mensal da cidade de Varginha, Minas Gerais (continuação).

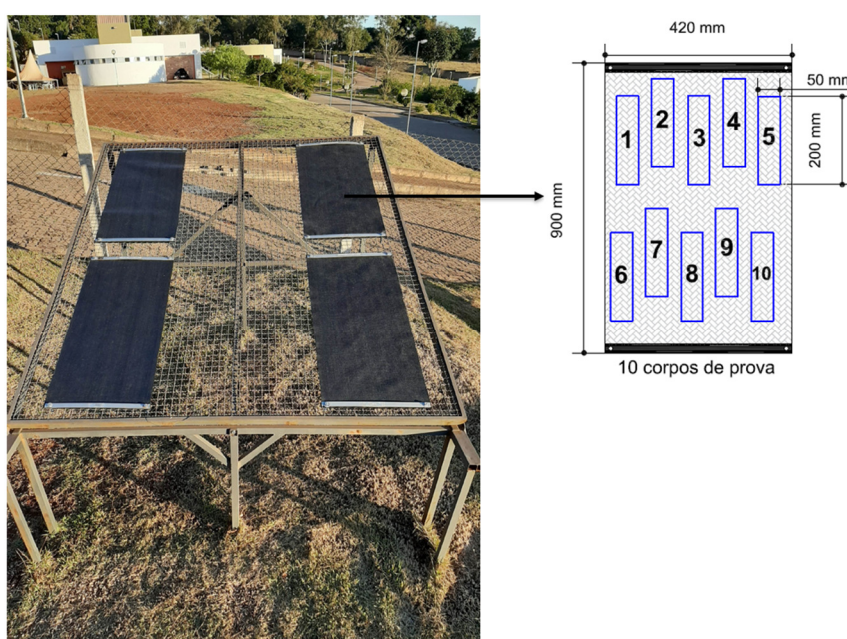
(d) Precipitação.

Fonte: Projeteer, 2021.

Os ensaios de durabilidade por intemperismo de campo foram realizados de acordo com as normas ISO 877-1 (2009) e ISO 877-2 (2009) a partir da fixação de amostras do geotêxtil em estrutura metálica que permite um fluxo livre de ar entre as partes superior e inferior das amostras. Denominada pelas normas supracitadas de exposição do tipo aberta (Figura 61), a estrutura para a exposição, instalada na área

experimental do CEFETMG, é composta por tela metálica galvanizada com malha de 30 mm x 30 mm. Apresenta inclinação de 22° em relação à horizontal, valor próximo à latitude do local de exposição (-21,5490° Sul) e fixada com a face inclinada orientada para o Norte geográfico (eixo Leste-Oeste), ou seja, em direção ao Equador. Tais condições garantem que as amostras estejam potencialmente mais expostas à radiação solar durante o dia (ISO 877-1, 2009; ISO 877-2, 2009). As amostras foram fixadas na estrutura com uso de garras de alumínio e parafusos galvanizados de modo não haver influência de superfícies oxidantes nas amostras em exposição.

Figura 61 - Estrutura metálica para ensaios de intemperismo de campo do tipo exposição aberta.



Fonte: a autora.

As amostras foram obtidas em amostragem única e aleatoriamente (ABNT NBR ISO 9862, 2013⁸) ao longo sentido longitudinal de fabricação. O tamanho amostral de 42 cm x 90 cm foi dimensionado de modo a ser obter a quantidade de 10 corpos de prova aleatórios para cada um dos períodos de exposição climática, que irão compor as análises estatísticas e probabilísticas, pelo tamanho amostral estimado para precisão da estimativa de até 1% (ver subitem 5.2).

Parâmetros meteorológicos foram coletados e tratados ao longo de todo o período de exposição por dados obtidos no Portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET⁹), vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, que

⁸ A norma ABNT NBR 9862 (2013) traz em seu subitem 3.2.5 o seguinte requisito: “A menos se requerido na norma de ensaio, para um mesmo tipo de ensaio, a mesma posição longitudinal ou transversal não pode ser repetida para os corpos de prova” [...].

⁹ Fonte: <https://mapas.inmet.gov.br/>

disponibiliza gratuitamente dados diários de estações meteorológicas automáticas e convencionais. Os dados referem-se à estação meteorológica automática na cidade de Varginha (Código: A515), em operação desde 12/07/2006 e localizada a -21,5663° Sul, -45,4041° Oeste e 949,78 m acima do nível do mar. A referida estação está localizada a uma distância em torno de 7km do CEFET-MG, nas instalações da Fazenda Experimental de Varginha mantida pela Fundação Procafé, que realiza pesquisas referentes a tecnologias cafeeiras.

Os parâmetros meteorológicos de interesse para a pesquisa são radiação solar global (MJ/m²), temperatura média diária (°C), umidade relativa do ar média diária (%) e precipitação diária acumulada (mm). A incidência de radiação ultravioleta (UV) durante os períodos de exposição climática foi estimada em 4,2% da incidência da radiação solar global (G), conforme detalhamentos apresentados no subitem 2.3.2 (Escobedo *et al.*, 2009; Escobedo *et al.*, 2011; Escobedo *et al.*, 2014; Leal; Tíba; Piacentini, 2011).

Devido ao período de início de exposição em campo desempenhar um relevante papel em estudos de durabilidade por intemperismo, estabeleceu-se sete períodos de exposição consecutivos e isolados, que consideram as estações climáticas separadamente. Conforme Tabela 8, o início das exposições ocorreu no inverno de 2020 e término ao final do outono de 2021, com a finalização completa em 365 dias. Ressalta-se que, a princípio, o início das exposições havia sido planejado para outono (21/03/2020). Contudo, devido a pandemia do novo coronavírus (Sars-Cov-2) e o emergente isolamento social na referida data, foi necessário um novo planejamento experimental para o início dos ensaios acumulados de campo na estação climática de inverno, que havia sido adotado em pesquisas anteriores (Guimarães *et al.*, 2020; Urashima *et al.*, 2020).

Tabela 8 - Períodos de exposição do geotêxtil tecido de polipropileno as intempéries.

Período ¹	Data	Tempo de exposição
I	21/06/2020 ² a 22/09/2020	93
P	22/09/2020 a 21/12/2020	90
V	21/12/2020 a 20/03/2021	90
O	20/03/2021 a 21/06/2021	92
I+ P	21/06/2020* a 21/12/2020	183
I + P + V	21/06/2020* a 20/03/2021	273
I + P + V + O	21/06/2020* a 21/06/2021	365

OBSERVAÇÃO: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²Com o inverno de 2020 em 20/06/2020 às 18h44min, as amostras de geotêxteis foram expostas ao intemperismo na manhã de 21/06/2020.

Fonte: a autora.

4.5.2 Durabilidade por sinergismo de fluência à tração e intemperismo de campo

O estudo da durabilidade sob fluência à tração e intemperismo consiste em compreender os efeitos da ação simultânea destes fatores de degradação mediante a exposição do material em estudo ao intemperismo e carregamento constante de fluência ao longo do tempo.

Estruturas metálicas com inclinação de 22° em relação à horizontal foram utilizadas para o estudo da durabilidade. Estas estruturas estão instaladas no mesmo local de exposição dos geotêxteis por intemperismo isoladamente (Figura 59), também com a face inclinada orientada para o Norte como garantia de exposição das amostras ao Sol durante o dia (ISO 877-1, 2009; ISO 877-2, 2009). Foi estabelecido o carregamento de fluência referente a 15% da resistência à tração máxima do geotêxtil, por exemplo, nível de carga próximo às condições de serviço aplicados a tubos geotêxteis para desaguamento e confinamento (ver Figura 7). A solicitação por fluência à tração foi realizada por cargas estáticas posicionadas excentricamente a garra inferior fixada em cada uma das amostras do geotêxtil.

A Figura 62 apresenta a estrutura para a realização dos ensaios propostos, cujas bases são concretadas ao solo para evitar quaisquer movimentações pela aplicação das cargas estáticas. Para o cálculo da quantidade de carga estática em cada amostra, foi utilizado como referência os resultados de caracterização mecânica pela norma ASTM D 5035 (2019). Como será apresentado no item 5.1 (Tabela 12), a resistência à tração máxima ($T_{\text{máx}}$) média é igual a 56,7 kN/m.

Para as condições de ensaio apresentadas, este estudo apresenta caráter inovador para a estimativa da probabilidade de durabilidade de geotêxteis e produtos correlatos aos geotêxteis sob fluência à tração e intemperismo simultaneamente, devido à realização de ensaios de fluência em campo em estruturas metálicas com inclinação, próxima à latitude local, que favorece a uma maior incidência da dinâmica climática sobre as amostras. Resultados preliminares nesta temática foram publicados em Guimarães *et al.* (2017) com cargas de fluência de 5% e 10% e tempo total de ensaio de 2160 horas (20/05/2015 a 18/08/2015).

Como metodologia de ensaio, de modo a garantir a adequada transferência do carregamento de 15% pela largura nominal das amostras em ensaio, os pórticos de fluência inclinada apresentam um sistema de roletes com tubos de alumínio (Figura 63), composto por um tubo único ancorado na estrutura e tubos de alumínio de maior

diâmetro com o envelopamento da largura disponível para o posicionamento de cada amostra sob fluência.

Figura 62 - Estrutura metálica para ensaios de sinergismo por fluência à tração e intemperismo.



Fonte: a autora.

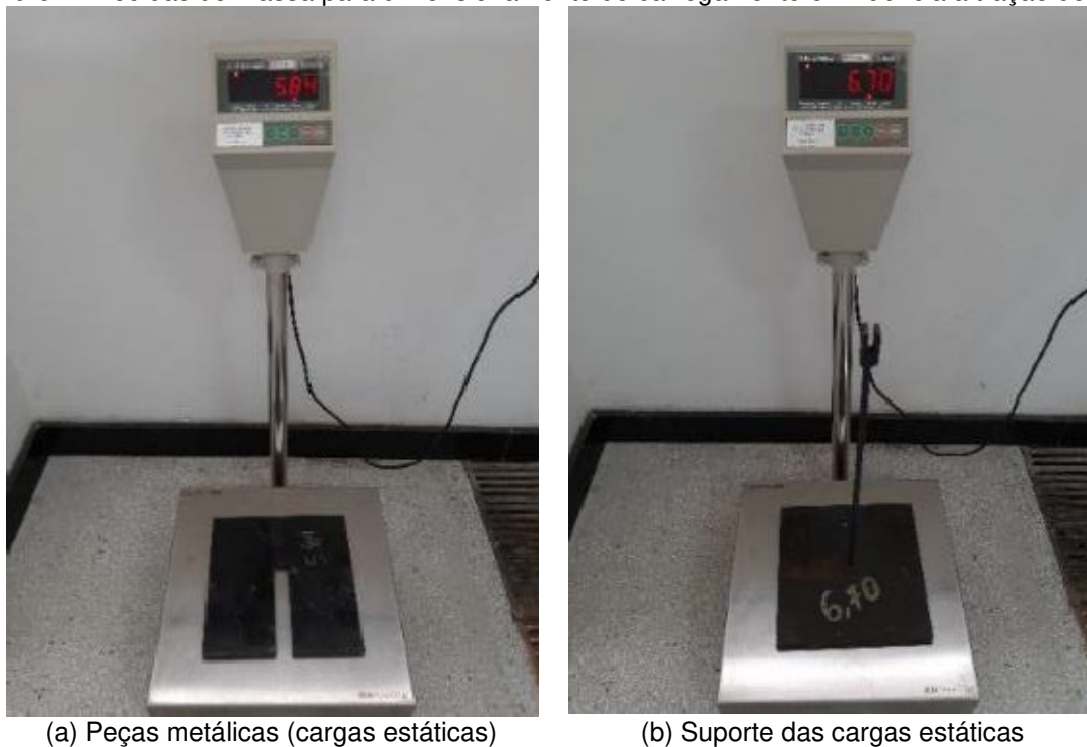
Figura 63 - Sistema de roletes com tubos de alumínio para a transferência da carga de fluência.



Fonte: a autora.

Para o dimensionamento e fixação das cargas de fluência de 15% na garra inferior do geotêxtil, também se considerou medidas de massa da garra inferior, das peças metálicas (cargas estáticas), bem como do suporte dos pesos. A Figura 64 apresenta procedimento de medidas de massa em balança digital de capacidade 100 kg.

Figura 64 - Medidas de massa para dimensionamento de carregamento em fluência à tração de 15%.



Fonte: a autora.

Após as medidas de massa de cada uma das cargas e suportes, bem como das garras inferiores, estes foram separados em conjuntos, de modo a aproximar o máximo possível da referida carga. Com o intuito de evitar a corrosão das cargas estáticas utilizadas durante os períodos de ensaios de campo, estas apresentam tratamento superficial de pintura (camada de zarcão e tinta esmalte), assim como as garras para a fixação das amostras e as estruturas metálicas.

A preparação das amostras para ensaios de fluência foi realizada mediante retirada de amostragens com largura nominal de 25 cm e comprimento de 135 cm de modo aleatório (ABNT NBR ISO 9862, 2013) e no sentido longitudinal de fabricação. Posteriormente, foram fixadas as garras superior e inferior, como apresentado na Figura 65. As garras foram confeccionadas com medidas de 250 mm x 50 mm em aço carbono e com quatro furos laterais para permitir a fixação do geotêxtil por parafusos de 5/16".

Internamente, as garras apresentam sistema de encaixe macho e fêmea para impedir o deslizamento da amostra com a aplicação do carregamento de fluência à

tração, além do uso de uma barra redonda lisa de 320 mm de comprimento e diâmetro de 3/8" para auxiliar na fixação (Figura 66). Após a fixação das amostras de geotêxtil no conjunto de garras, estas passaram por um ajuste final em morsa de bancada (Figura 67).

Figura 65 - Amostras de geotêxtil preparadas para a realização da degradação sob fluência à tração e intemperismo de campo.



Fonte: a autora.

Figura 66 - Detalhes do conjunto garra e fixação da amostra de geotêxtil.



Fonte: a autora.

Figura 67 - Ajuste final das amostras de geotêxtil no conjunto de garras em morsa de bancada.

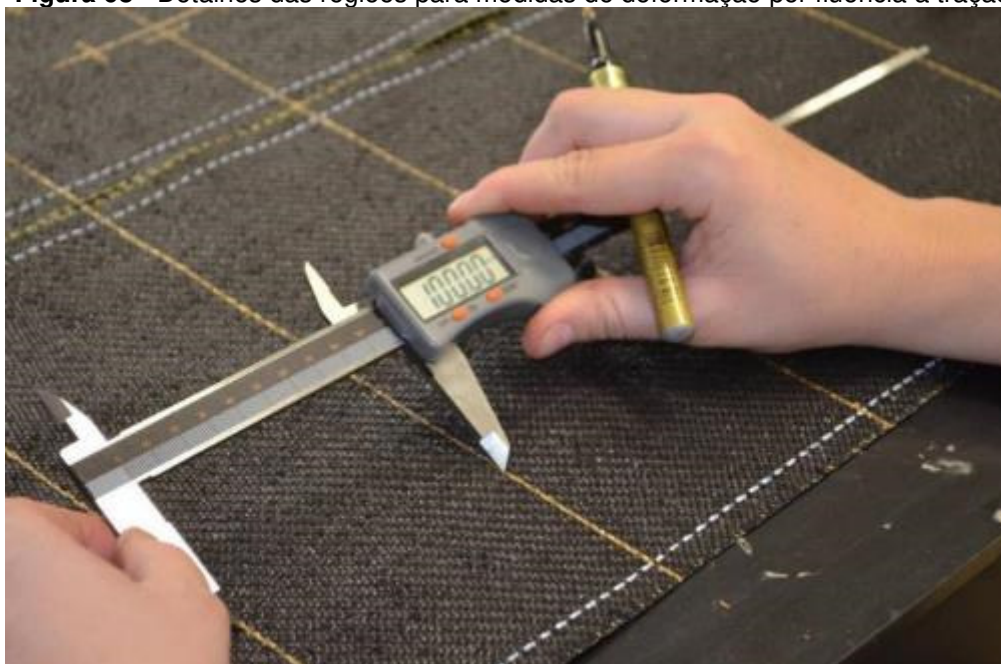


Fonte: a autora.

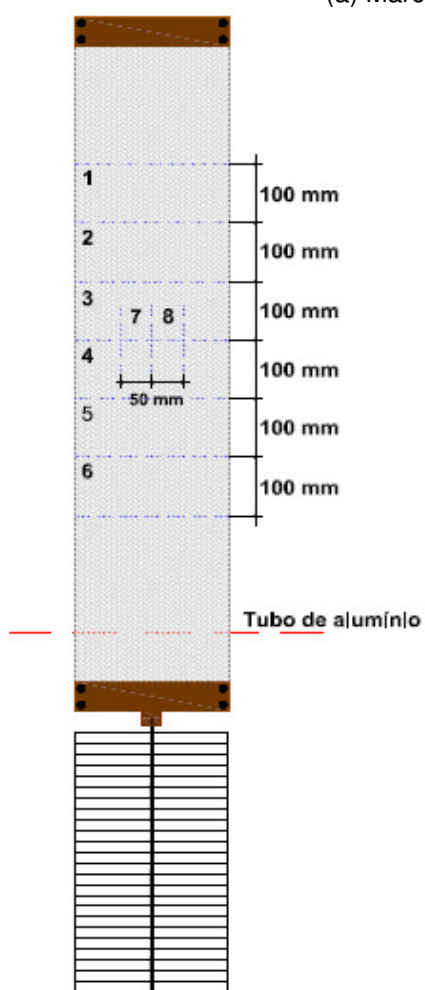
Ao longo dos ensaios, foram obtidas medidas de deformações longitudinais e transversais por fluência à tração no geotêxtil. Para tanto, estabeleceu-se 8 regiões no geotêxtil para medidas de deformação, com a realização de 3 pontos para cada uma das regiões. Definiram-se regiões acima e abaixo da faixa central do geotêxtil, para medidas longitudinais, e ao longo da faixa central, para deformações transversais. Na Figura 68, têm-se procedimento de marcação das regiões no geotêxtil com uso de paquímetro digital e caneta de escrita permanente, detalhes das regiões estabelecidas para medidas de deformações e seus respectivos comprimentos iniciais, bem como a leitura das deformações em campo.

Para evitar a ocorrência de deformações ao longo dos acréscimos das cargas estáticas na garra inferior do geotêxtil, adotou-se como metodologia o uso de macaco hidráulico, de modo a realizar o posicionamento de todos os pesos em um suporte intermediário, composto por haste metálica e base quadrada. Este é apoiado na estrutura por um gancho auxiliar e, posteriormente, a sua fixação na garra inferior. Ou seja, a solicitação da carga de 15% no mesmo instante pelo rebaixamento da altura do macaco hidráulico. Estes procedimentos estão apresentados na Figura 69. Foi necessária a abertura de valas entre as bases das estruturas metálicas para o posicionamento do macaco hidráulico, em comparação a pesquisa anterior (Guimarães *et al.*, 2017).

Figura 68 - Detalhes das regiões para medidas de deformação por fluência à tração.

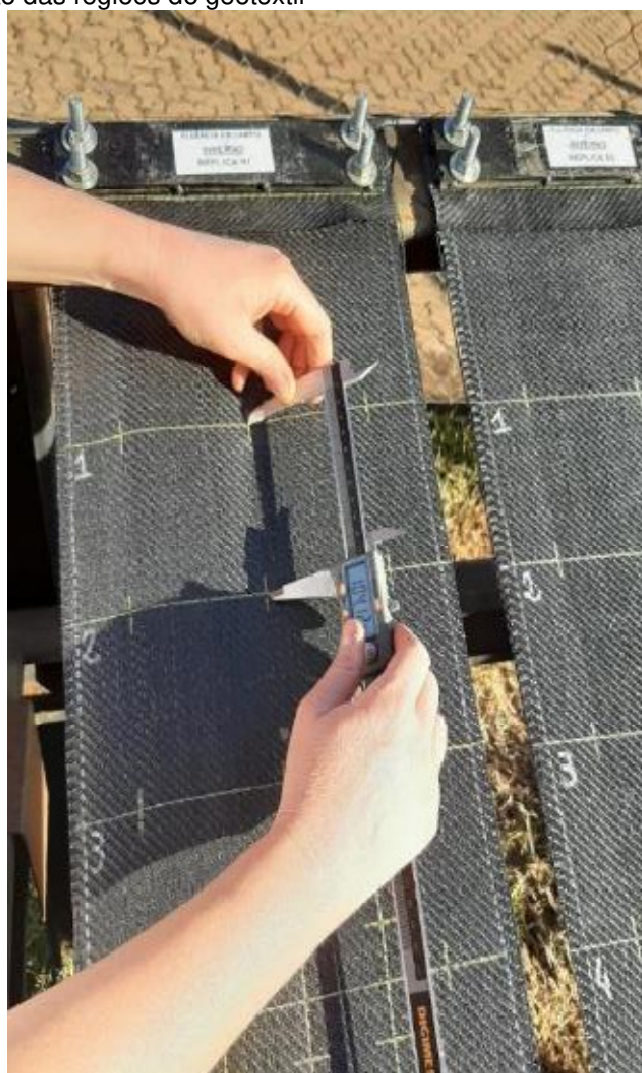


(a) Marcação das regiões do geotêxtil



Carregamento de 15%
(medidas fora de escala)

(b) Comprimentos iniciais das regiões



(c) Medidas de deformações em campo

Fonte: a autora.

Figura 69 - Utilização de macaco hidráulico nos ensaios de fluência.



Gancho auxiliar do conjunto
de pesos posicionados no
suporte intermediário

(a) Detalhes do posicionamento dos pesos no suporte intermediário.

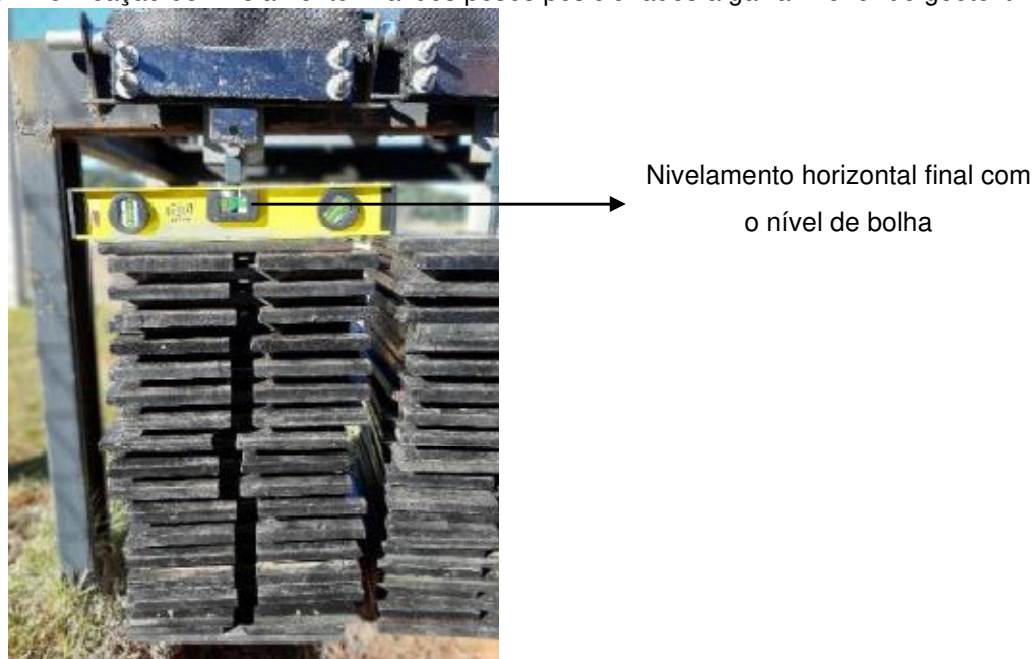


(b) Uso de macaco hidráulico para suspensão e fixação do conjunto de pesos na garra inferior das amostras.

Fonte: a autora.

Ao longo do posicionamento dos pesos no suporte intermediário, verificou-se o nivelamento dos carregamentos pelo uso de um nível de bolha e, também, a conferência final do nivelamento após o alívio da suspensão dos pesos pelo macaco hidráulico, como apresentado na Figura 70.

Figura 70 - Verificação do nivelamento final dos pesos posicionados à garra inferior do geotêxtil



Fonte: a autora.

De modo a evitar quaisquer interferências pela retirada das cargas estáticas das amostras finalizadas, foi adotado como procedimento a manutenção do conjunto de cargas no pórtico inclinado, mediante o uso de ganchos auxiliares ao conjunto de cargas, conforme apresentado na Figura 69a. Além disso, devido os ensaios terem sido realizados durante o período de isolamento social pela pandemia do novo coronavírus (Sars-Cov-2), não ocorreram quaisquer interferências quanto a trepidações nos pórticos que poderiam ter sido ocasionados por trânsitos veiculares, embora os pórticos estejam fixados ao solo por concretagens de sua base.

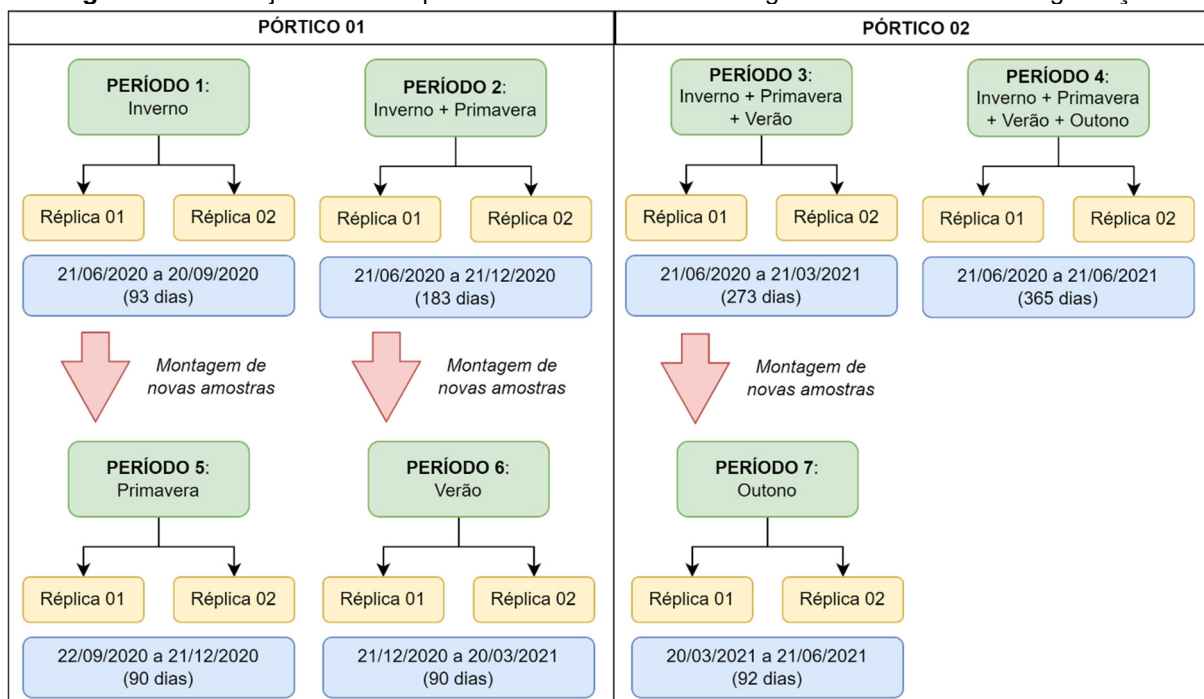
Os períodos de exposição das amostras do geotêxtil tecido de polipropileno submetidas ao sinergismo por fluência à tração e intemperismo são os mesmos para a exposição apenas por intemperismo, conforme Tabela 8. Ou seja, os ensaios de sinergismo ocorreram no início do inverno de 2020 (21/06/2020) e término ao final do outono de 2021 (21/06/2021), o qual corresponderam a 7 (sete) períodos de exposição consecutivos.

Para cada período realizou-se a montagem de réplicas (2 amostragens) de modo a obter resultados representativos para embasamento nas análises de durabilidade,

assim como a detecção de possíveis erros operacionais. A Figura 71 apresenta o detalhamento dos períodos de exposição para os ensaios de sinergismo.

Por último, os tamanhos amostrais do geotêxtil permitiram a extração de 10 corpos de prova aleatórios no sentido longitudinal de fabricação (Figura 72) para a ponderação da durabilidade sob condições de sinergismo (ver subitem 5.2).

Figura 71 - Planejamento dos períodos de ensaios de sinergismo dos fatores de degradação.



Fonte: a autora.

Figura 72 - Planejamento para a obtenção de corpos de prova nas amostras expostas.



Fonte: a autora.

4.5.3 Durabilidade por fluência à tração em laboratório

Devido a realização de ensaios de sinergismo em estruturas inclinadas a 22° , situação estabelecida para maior incidência de radiação solar nas amostras em estudo durante o dia, foram realizados ensaios de fluência em laboratório com o intuito de verificar se há influência, ou não, no sistema de transferência das cargas estáticas pela largura das amostras de geotêxteis na situação inclinada. Ou seja, se o comportamento de fluência à tração inclinada apresenta resultados similares aos ensaios de fluência do tipo convencional. Caso contrário, qual a possível interferência do sistema de roletes com tubos de alumínio na efetividade das transmissões de carga de fluência aos geotêxteis (como apresentado na Figura 63).

Foi utilizada uma estrutura metálica com o mesmo comprimento útil das amostras e com a inclinação de 22° em relação à horizontal (Figura 73), ou seja, a manutenção das mesmas condições de fixação das amostras e aplicação das cargas de fluência realizadas em campo. A Figura 74 apresenta o ensaio de fluência à tração não confinada (convencional). Ambos os ensaios foram feitos sob carga de 15% à tração e tempo total de ensaio de 93 dias, correspondente ao período de inverno (Tabela 8).

Figura 73 - Ensaio de fluência à tração em plano inclinado de 22° em laboratório.



Fonte: a autora.

Figura 74 - Ensaio de fluência à tração não confinada em laboratório.



Fonte: a autora.

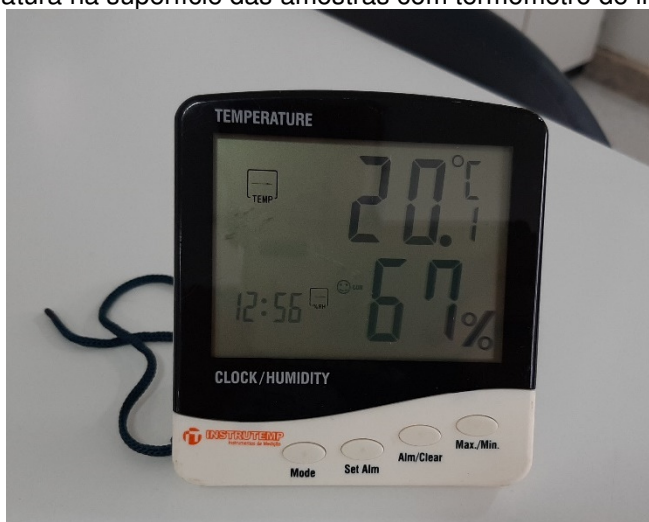
Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia do CEFET-MG, Unidade Varginha, em temperatura interna controlada de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ com uso de ar-condicionado e verificações com termômetro digital (temperatura e umidade relativa do ar no laboratório) e de infravermelho (temperatura na superfície das amostras), indicados na Figura 75.

Ressalta-se que o período de 93 dias de ensaios em laboratório visou a obtenção de resultados a serem comparados com o período de exposição em campo (inverno) e, assim, avaliar o fenômeno de sinergismo de degradação para as condições estabelecidas no planejamento experimental. As inferências foram baseadas em medidas de deformações (8 áreas demarcadas), bem como por parâmetros mecânicos retidos (ASTM D 5035, 2019) pela extração aleatória de 10 corpos de prova de cada réplica. Ademais, os ensaios de fluência não confinada foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 15226 (2005), em vigência na época dos ensaios, ao invés da norma ABNT NBR ISO 13431 (2022).

Figura 75 - Ensaio de fluência com temperatura interna controlada em laboratório.



(a) Temperatura na superfície das amostras com termômetro de infravermelho



(b) Controle da temperatura e umidade relativa do ar interna do laboratório com termômetro digital
Fonte: a autora.

4.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO E ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA DURABILIDADE

4.6.1 Teste de hipóteses de aderência à distribuição normal

Testes de aderência à distribuição normal foram realizados para os resultados obtidos na caracterização mecânica do geotêxtil tecido de polipropileno, bem como após ensaios de durabilidade por intemperismo e fluência à tração, isolados e simultaneamente. O objetivo é avaliar se a média ($\bar{x}$) e desvio padrão (s) amostrais são bons estimadores para média (μ) e desvio padrão (σ) populacionais (TRIOLA, 2008). Para tanto, foram atribuídas as hipóteses nulas (H_0) e alternativa (H_1):

H_0 : a amostra (ou resultados amostrais intactos e após ensaios de durabilidade) é proveniente de uma distribuição normal, ou seja, população com média e desvio-padrão desconhecidos – $N(0,1)$;

H_1 : a amostra (ou resultados amostrais intactos e após ensaios de durabilidade) não é proveniente de uma população com distribuição normal.

Empregou-se os testes de aderência por Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, de modo que um teste de aderência seja analisado como contraprova ao outro método ($n \leq 30$). Ambas as análises foram feitas com o uso do *software* estatístico R (R Core Team, 2021) de código aberto destinado a inúmeras análises interativas e exploratórias de dados. As rotinas R empregadas estão detalhadas no Apêndice C.

Teste de aderência por Shapiro-Wilk objetiva obter uma estatística de teste (W) que avalia diretamente a hipótese de normalidade, invariante em escala e origem, o qual fornece um teste da hipótese nulo (H_0) composta de normalidade. O referido método é considerado eficaz para inferências de normalidade mesmo para amostras pequenas ($n < 20$), conforme bibliografia introdutória deste método (Shapiro; Wilk, 1965).

Ao se obter a estatística de teste W , este é diretamente comparado a um valor crítico tabelado para o método a partir de um nível de confiança e o número total de dados (n) por teste de hipótese. A estatística de teste W é obtida pela Equação 34 (Shapiro; Wilk, 1965), que requer a ordenação dos resultados obtidos:

$$W = \frac{[\sum_{i=1}^k a_{n-i+1}(y_{n-i+1} - y_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (34)$$

Dado que,

a_{n-i+1} = valor tabelado (Shapiro; Wilk, 1965), que depende do número de observações (n) e a posição ordenada (i) das observações;

y_i = valor do resultado ordenado ($y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_n$);

$\bar{y}$ = valor médio das observações;

$k = (n+1)/2$ se n ímpar ou $n/2$ se n par.

A hipótese de normalidade (H_0) não poderá ser rejeitada se o resultado W for maior do que o valor tabelado crítico ($W^{\text{crítico}}$) para o nível de significância adotado (Shapiro; Wilk, 1965). Neste trabalho, todas as análises foram feitas com níveis de significância de 5%, ou seja, p-valor igual a 0,05.

O teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov determina se os resultados amostrais podem ser razoavelmente provenientes de uma população com certa distribuição teórica (ou de referência). O referido teste baseia-se na distância máxima entre as distribuições observada e a teórica de referência (por exemplo, distribuição Normal), de modo que a distribuição teórica representa o que se poderia esperar sob H_0 (Siegel, 1975). A estatística de teste D é obtida pelo maior valor entre D_1 e D_2 (Equação 35), obtidos pela Equação 36 e Equação 37 (Siegel, 1975; Lilliefors, 1967):

$$D = \max(D_1, D_2) \quad (35)$$

$$D_1 = \sup_x |F^*(x_{(i)}) - S(x_{(i)})| \quad (36)$$

$$D_2 = \sup_x |F^*(x_{(i)}) - S(x_{(i-1)})| \quad (37)$$

Dado que,

D = desvio máximo;

$S(x)$ = distribuição de frequência acumulada de uma amostra aleatória $x_1, x_2, \dots, x_n$;

$F^*(x)$ = distribuição de frequência acumulada, teórica, sob H_0 .

A hipótese de normalidade (H_0) não poderá ser rejeitada se a estatística de teste D for menor do que o valor tabelado crítico ($D^{\text{crítico}}$) para o nível de significância adotado. $D^{\text{crítico}}$ depende diretamente do tamanho amostral (n) e do nível de significância adotado, adotado p-valor igual a 0,05. Em analogia a Shapiro-Wilk, o teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov também é sensível a amostragens pequenas (Siegel, 1975; Lilliefors, 1967).

4.6.2 Comparação entre médias amostrais

Especificamente aos resultados (variável resposta) obtidos por sinergismo entre fluência à tração e intemperismo para os períodos de exposição (inverno, primavera, verão e outono), denominado de fator, realizou-se análise de variância (ANOVA) para se avaliar possíveis comportamentos similares em termos de resistências à tração

retidas média entre os períodos de exposição analisados. A referida inferência não foi realizada para amostras expostas isoladamente ao intemperismo devido à ausência de réplicas para esta condição de estudo.

Para tanto, foram atribuídas as seguintes hipóteses nulas (H_0) e alternativa (H_1) para se testar a igualdade dos efeitos do fator:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$ (ou seja, não há diferenças entre as médias dos quatro períodos de exposição);

H_1 : a média de pelo menos um dos grupos se difere das demais.

O Teste F por ANOVA, obtido pela relação da variância entre os tratamentos pela variância dentro dos tratamentos (F_0), direciona a aceitação ou rejeição da H_0 supracitada. A hipótese H_0 é rejeitada se a estatística de teste (F_0) apresentar valor superior a $f_{\alpha, a-1, a(n-1)}$, que é um valor tabelado. Neste caso, α é o nível de significância (igual a 0,05 ou 5%), n refere-se ao número de observações ($n = 2$) obtidos para as médias entre as réplicas (R1 e R2) e a corresponde ao total de tratamentos (ou níveis), ou seja, os períodos de exposição em análise ($a = 4$). Tabela 9 sumariza a análise de variância para experimentos com único fator.

Tabela 9 - ANOVA para um experimento com um único fator.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados ⁽²⁾	GL ⁽³⁾	Média Quadrática ⁽⁴⁾	F_0 ⁽⁵⁾
T ⁽¹⁾	$SQ_{Tratamentos} = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i.}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$a - 1$	$MQ_{Tratamentos} = \frac{SQ_{Tratamentos}}{(a - 1)}$	$\frac{MQ_{Tratamentos}}{MQ_E}$
Erro	$SQ_E = SQ_T - SQ_{Tratamentos}$	$a(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{[a(n - 1)]}$	
Total	$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	$an - 1$		

*OBSERVAÇÃO: ⁽¹⁾Tratamentos; ⁽²⁾ Soma quadrática dos tratamentos ($SQ_{Tratamentos}$), Soma quadrática do erro (SQ_E) e Soma quadrática total (SQ_T); ⁽³⁾ Graus de liberdade; ⁽⁴⁾ Média quadrática dos tratamentos ($MQ_{Tratamentos}$) e Média quadrática do erro (MQ_E); ⁽⁵⁾ Estatística de teste.

Fonte: Montgomery; Runger (2013). Adaptada pela autora.

Em caso de H_0 rejeitada na ANOVA, emprega-se algum método de comparações múltiplas como análise complementar. Neste trabalho, foi utilizado o método de Fischer da mínima diferença significativa (MDS), que compara todos os pares de médias (neste caso, entre os tratamentos) com $H_0: \mu_i = \mu_j$ (para todo $i \neq j$), a partir da estatística t apresentada na Equação 38 (Montgomery; Runger, 2013):

$$MDS = t_{\alpha/2, a(n-1)} \sqrt{\frac{2MQ_E}{n}} \quad (38)$$

Dado que,

MDS = Mínima diferença significativa;

$t_{\alpha/2, a(n-1)}$ = distribuição t Student com $a(n - 1)$ graus de liberdade;

MQ_E = Média quadrática do erro (obtida na Tabela 9).

4.6.3 Inferências estatísticas amostrais e populacionais

Os conjuntos de dados amostrais (intactos e submetidos aos ensaios de durabilidade) de resistências à tração máxima ($T_{\text{máx}}$) retidas foram ponderados por valores médios e coeficientes de variação, além de inferência amostral por distribuição de caixas (*Blox-plot*) e inferência populacional por intervalos de confiança (IC), com nível de confiança de 95% (conforme descrito em 3.3.4). Estas análises são de suma importância para o entendimento macro da influência dos fatores de degradação e do sinergismo nas propriedades mecânicas retidas por inferência estatística na variabilidade dentro e entre os conjuntos (ou tratamentos) de resultados (Montgomery; Runger, 2012).

Modelos matemáticos que melhor descreve a resistência à tração máxima (kN/m) e perdas de resistências à tração (%) em função das incidências de radiação UV estimadas (MJ/m²) nos períodos de exposição acumulados foram obtidos para as condições de estudo por regressão linear, com o intuito de se compreender o comportamento da durabilidade por fatores que podem induzir a sua degradação (Maxwell *et al.*, 2005). A escolha pela radiação UV estimada como variável do modelo deu-se pelo consenso na literatura sobre os seus efeitos em mecanismos de fotodegradação, contudo sem excluir a holística complexa da dinâmica climática incidente nos períodos de exposição ao intemperismo.

4.6.4 Inferências probabilísticas de durabilidade por sinergismo

As inferências probabilísticas foram realizadas para a estimativa da durabilidade a partir das condições experimentais analisadas. Sua importância visa agregar em tomadas de decisões a partir do parâmetro fator de incertezas (f_s) adotado no dimensionamento de propriedades requeridas de geossintéticos de forma

determinística, conforme apresentado nas Equações 2 e 3. À vista disso, a ponderação de incertezas inerentes às condicionantes do projeto para se garantir a manutenibilidade das propriedades disponíveis dos geossintéticos por dimensionamento racional a partir de ferramentas probabilísticas de confiabilidade.

As análises probabilísticas realizadas tomaram como evento os resultados obtidos nos experimentos, planejados de modo que os resultados amostrais sejam bons estimadores para os parâmetros populacionais, o qual é atribuído de espaço amostral. Isto foi possível pela definição do tamanho amostral (item 4.4) a partir da variabilidade inerente do geotêxtil empregado nesta pesquisa.

A proposta de análise estabeleceu como critério a probabilidade de resistências à tração máxima retidas ($T_{m\acute{a}x}$) apresentarem resultados superiores a níveis de percentuais de resistências, denominados de censuras, em relação a resistência à tração máxima intacta. Para tanto, foram adotados três níveis de percentuais de resistências à tração retidos como parâmetros de censura (%):

- probabilidade de 80%: $P [X > 0,80T_{m\acute{a}x}]$;
- probabilidade de 60%: $P [X > 0,60T_{m\acute{a}x}]$;
- probabilidade de 50%: $P [X > 0,50T_{m\acute{a}x}]$.

Os valores de censura iguais a 80% e 60% foram estabelecidos a partir de percentuais abordados na norma ISO/TS 13434 (2020) referentes as resistências à tração retidas após ensaios de durabilidade acelerada por intemperismo (EN 12224, 2000) direcionados a aplicações de geossintéticos em reforço ou cuja propriedade de resistência à tração a longo prazo é um parâmetro significativo. A censura de 50% refere-se ao conceito de meia-vida (Brand; Pang, 1991; Greenwood; Curson, 2012; Koerner; Hsuan; Koerner, 2017). No Apêndice C, encontram-se as rotinas do *software* R empregadas para a referida análise.

Além disso, aplicou-se o conceito de Análise de Confiabilidade por Probabilidades de Falha [$F(UV)$] e de Sobrevivência [$S(UV)$] a partir do modelo probabilístico por distribuição de Weibull (Equação 39) que é aplicado em análises de confiabilidade para testes de vida útil acelerado, a partir da proposta exemplificada na norma ASTM G 166 (2020). A referida análise parte do princípio em se obter projeções probabilísticas razoáveis para análises de durabilidade por extrapolações além do intervalo de dados obtidos a partir de um modelo de distribuição que melhor se ajusta ao conjunto de dados amostrais (ASTM G 166, 2020).

$$F(UV) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (39)$$

Dado que,

$F(t)$ = probabilidade de falha por distribuição Weibull;

UV = estimativa de radiação UV incidente nos períodos analisados;

α = parâmetro de escala;

β = parâmetro de forma.

A proposta não é ponderar o tempo até a ocorrência de falha, mas sim o comportamento da variável resposta (resistência à tração retida) em função da incidência de radiação UV estimada (MJ/m^2), dependente do tempo total de exposição (dias), até possíveis níveis que possam comprometer o seu desempenho em aplicações sob sinergismo de fluência à tração e intemperismo.

Foram analisados os resultados obtidos no estudo de durabilidade por fluência à tração e intemperismo simultâneos para os períodos de inverno (isolado) e demais períodos acumulados (inverno + primavera; inverno + primavera + verão; inverno + primavera + verão + outono). Foram estabelecidos dois níveis de censuras supracitados ($80\%T_{\text{máx}}$ e $60\%T_{\text{máx}}$) para a obtenção de probabilidades de falha $[F(UV)]$ e de sobrevivência $[S(UV)]$ a partir da função densidade de probabilidade de Weibull. Ressalta-se que a referida norma (ASTM G 166, 2020) trata de parâmetros obtidos em ensaios de vida acelerado em laboratório, cuja proposta foi adotada nas condições experimentais planejadas neste estudo.

De modo a verificar a aplicabilidade dos resultados amostrais à distribuição Weibull para análise de confiabilidade (descrito em 3.2.2.2), inicialmente foi realizado teste de aderência a referida distribuição. A prova de aderência empregada foi por Kolmogorov-Smirnov no *software* R (Apêndice C), conforme descrito em 4.6.1., porém com adequação as seguintes hipóteses:

H_0 : o modelo de distribuição Weibull se ajusta ao conjunto de dados amostrais provenientes de ensaios de durabilidade;

H_1 : o modelo de distribuição Weibull não se ajusta ao conjunto de dados amostrais.

As etapas subsequentes referem-se à obtenção de parâmetros de forma e de escala da distribuição Weibull (Equação 11) com a aplicação de formulações descritas na norma ASTM G 166 (2020), sumarizadas a seguir:

- **parâmetro de forma (δ):** corresponde ao coeficiente angular obtido na equação de regressão para os parâmetros X (Equação 40) *versus* Y (Equação 41) calculados:

$$X = \ln(t) \quad (40)$$

Dado que,

t = períodos de exposição (ou tempo de ensaio).

$$Y = \ln \left[\ln \frac{1}{1 - F(t)} \right] \quad (41)$$

Dado que,

$F(t)$ = probabilidade de falha por classificação mediana, obtido na Equação 42.

$$F(t) = \frac{j - 0,3}{n + 0,4} \quad (42)$$

Dado que,

j = posição do resultado amostral ordenado;

n = número total de resultados.

Para as condições desta pesquisa, t foi alterado para radiação UV incidente estimada aos intervalos de exposição de campo.

- **parâmetro de escala (α):** obtido pela Equação 43:

$$\alpha = \exp \left[\frac{-y_0}{\delta} \right] \quad (43)$$

Dado que,

δ = parâmetro de forma;

y_0 : = coeficiente linear obtido na equação de regressão para os parâmetros X (Equação 40) *versus* Y (Equação 41) calculados.

Por último, a realização de análises gráficas por probabilidades de falha [$F(UV)$] e de sobrevivência [$S(UV) = 1 - F(UV)$] para os níveis de censuras escolhidos ($80\%T_{\text{máx}}$ e $60\%T_{\text{máx}}$) em relação a estimativa de radiação UV incidente (MJ/m^2) para os períodos analisados. Destaca-se a inviabilidade da referida análise para censura igual a $50\%T_{\text{máx}}$, uma vez que apenas os períodos de exposição de inverno a verão (273 dias) e período total de 365 dias obtiveram resultados de resistência à tração retidas inferiores a 28,4 kN/m. Posto isto, análises gráficas deste método se tornam inviáveis para apenas dois conjuntos de resultados amostrais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO GEOTÊXTIL TECIDO DE POLIPROPILENO

A Tabela 10 sumariza os resultados da caracterização do geotêxtil tecido de polipropileno em termos de massa por unidade de área (g/m^2). Na Tabela 11, tem-se resultados de caracterização por espessura (mm). A partir dos dados experimentais, o geotêxtil apresenta valores médios de massa por unidade de área de $252,80 \text{ g/m}^2$ e espessura igual a $0,814 \text{ mm}$.

Tabela 10 - Caracterização do geotêxtil tecido de polipropileno em massa por unidade de área

Corpo de prova	Medidas Laterais (cm)						Massa (g)	Área (cm^2)	Massa por unidade de área
	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆			
1	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,527	100,00	252,70
2	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,541	100,00	254,10
3	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,569	100,00	256,90
4	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,520	100,00	252,00
5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,510	100,00	251,00
6	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,539	100,00	253,90
7	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,524	100,00	252,40
8	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,516	100,00	251,60
9	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,535	100,00	253,50
10	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	2,499	100,00	249,90
Valor médio									252,80 g/m^2
Coeficiente de variação (C.V.)									0,77%

Fonte: a autora.

Tabela 11 - Caracterização do geotêxtil tecido de polipropileno por espessura

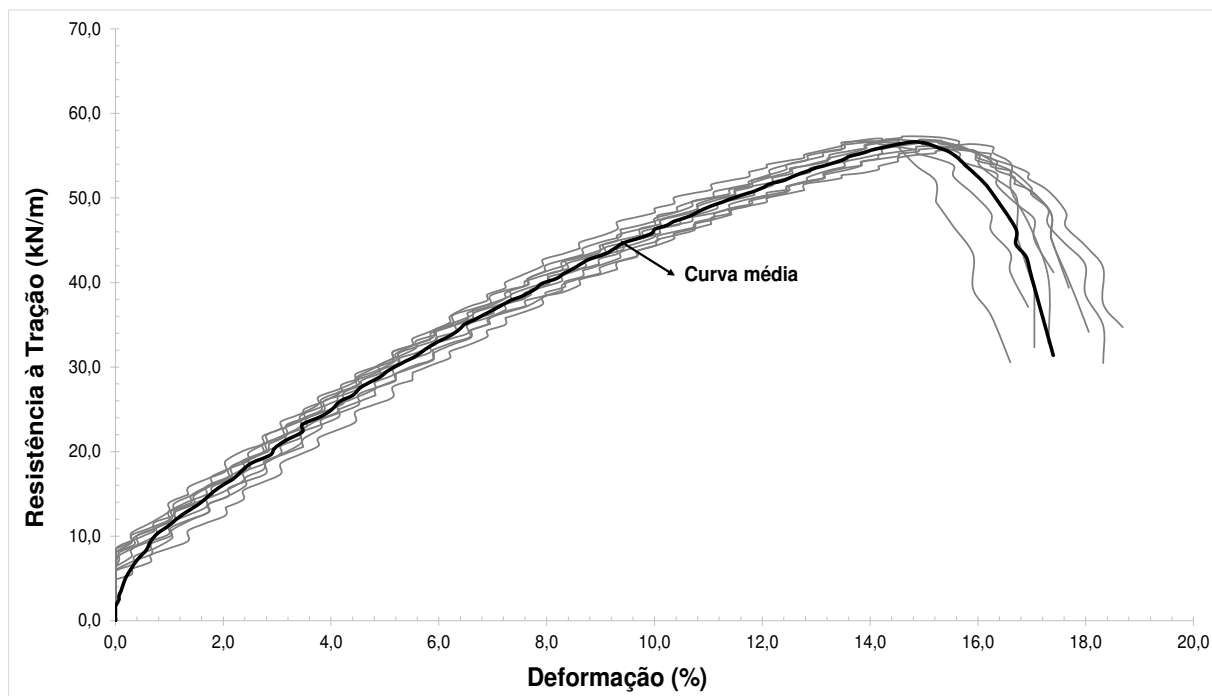
Corpo de prova	Espessura (mm)			Espessura
	E ₁	E ₂	E ₃	
1	0,825	0,828	0,849	0,834
2	0,796	0,820	0,816	0,811
3	0,777	0,834	0,836	0,816
4	0,816	0,817	0,751	0,795
5	0,820	0,785	0,757	0,787
6	0,844	0,826	0,825	0,832
7	0,877	0,794	0,817	0,829
8	0,799	0,759	0,826	0,795
9	0,794	0,842	0,816	0,817
10	0,816	0,843	0,816	0,825
Valor médio				0,814 mm
Coeficiente de variação (C.V.)				2,07 %

Fonte: a autora.

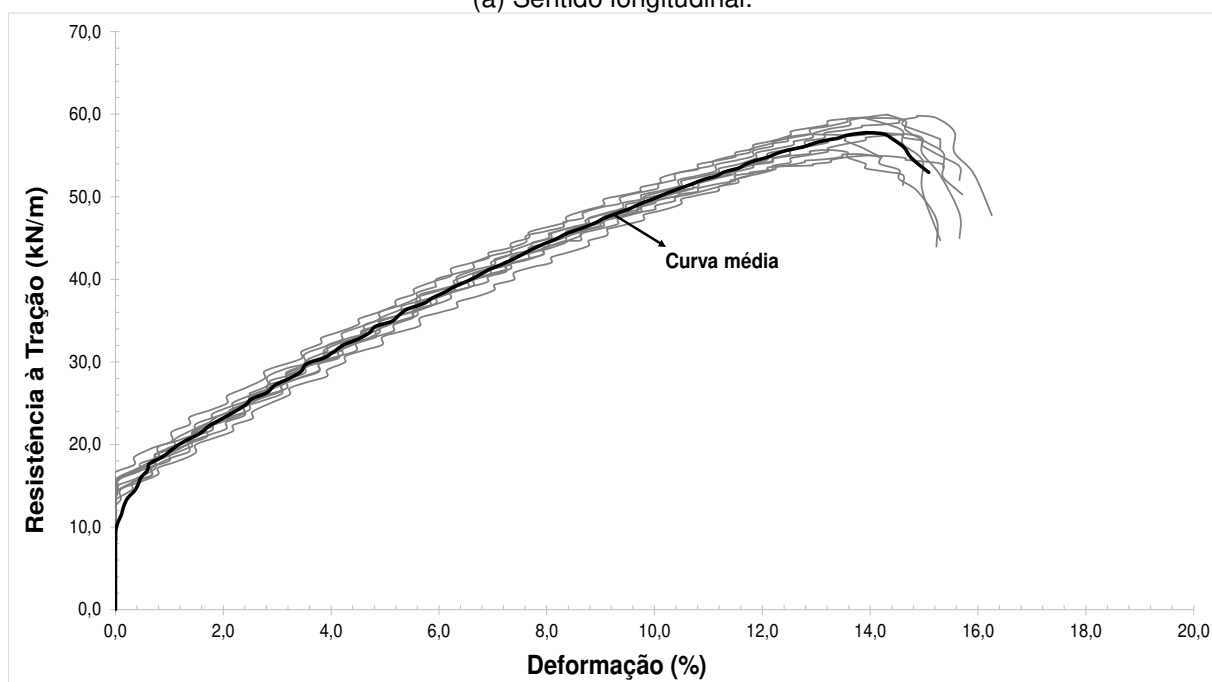
A Figura 76 apresenta as curvas de deformação (%) por resistência à tração (kN/m) do geotêxtil tecido de polipropileno intacto nos sentidos longitudinal e transversal de fabricação, com as respectivas curvas médias, obtidas com taxa de aquisição de dados de 30 Hz de deformação (mm) e carga (N) ao longo do tempo e tamanho amostral (n_0) igual a 10.

Na Tabela 12, tem-se os parâmetros mecânicos obtidos, bem como a obtenção de intervalos de confiança (IC), com nível de confiança de 95%, a partir dos resultados amostrais. No sentido longitudinal de fabricação, a resistência à tração máxima média é igual a 56,7 kN/m e deformação à carga máxima média de 14,8%. Para o sentido transversal, os valores médios obtidos são iguais a 57,8 kN/m e 14,0%.

Figura 76 - Curvas de deformação (%) por resistência à tração (kN/m) do geotêxtil tecido de polipropileno intacto.



(a) Sentido longitudinal.



(b) Sentido transversal.

Fonte: a autora.

Tabela 12 - Caracterização mecânica do geotêxtil tecido de polipropileno.

Parâmetros	Sentido longitudinal	
	Resistência à tração máxima - kN/m ($T_{m\acute{a}x}$)	Deformação à carga máxima - % ($\epsilon_{m\acute{a}x}$)
Valor médio	56,7	14,8
Desvio padrão	0,5	0,6
Coeficiente de variação	0,8%	3,3%
$t_{(n-1); \alpha/2} = (t_{9; 0,025})^*$	2,262	2,262
Intervalo de confiança (nível de confiança de 95%)	56,3 kN/m < $\bar{x}$ < 57,0 kN/m	14,4 % < $\bar{x}$ < 15,3 %

Parâmetros	Sentido transversal	
	Resistência à tração máxima - kN/m ($T_{m\acute{a}x}$)	Deformação à carga máxima - % ($\epsilon_{m\acute{a}x}$)
Valor médio	57,8	14,0
Desvio padrão	2,0	0,6
Coeficiente de variação	3,4%	4,3%
$t_{(n-1); \alpha/2} = (t_{9; 0,025})^*$	2,262	2,262
Intervalo de confiança (nível de confiança de 95%)	56,4 kN/m < $\bar{x}$ < 59,2 kN/m	13,5 % < $\bar{x}$ < 14,4 %

OBSERVAÇÃO: *Valor crítico da distribuição t de Student para tamanho amostral igual a 10 (graus de liberdade igual a 9) e nível de confiança de 95%.

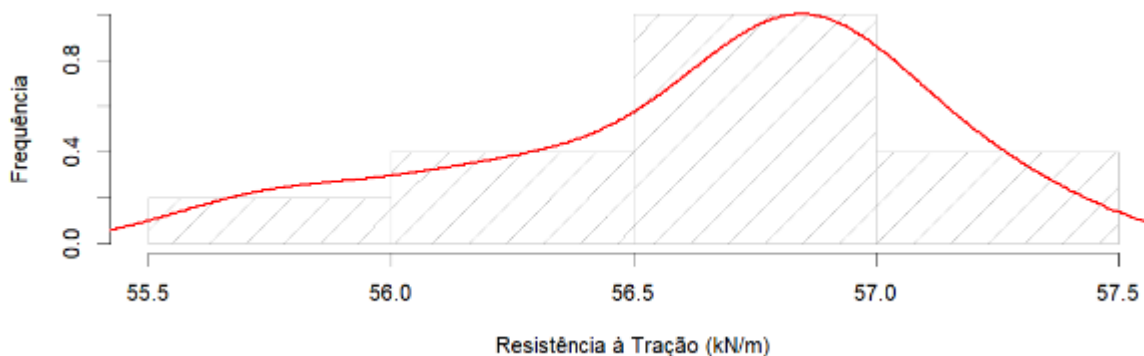
Fonte: a autora.

É possível verificar uma maior variabilidade nos resultados obtidos no sentido transversal de fabricação, devido ao próprio processo de fabricação do geotêxtil tecido. Portanto, adotou-se a obtenção de amostragens para os ensaios de durabilidade no sentido longitudinal de fabricação e as análises estatísticas inicialmente em termos de intervalos de confiança (IC) a partir do geotêxtil intacto (56,3 kN/m < $\bar{x}$ < 57,0 kN/m).

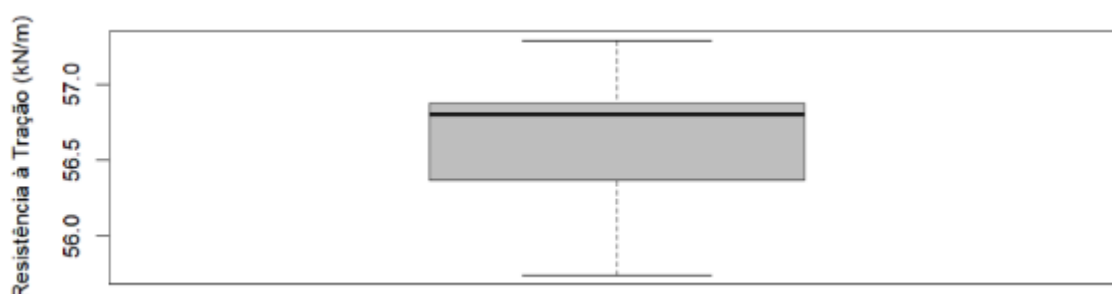
A Figura 77 apresenta a distribuição dos resultados amostrais, no sentido longitudinal de fabricação, por histograma de frequências e diagrama de caixas, ambos obtidos no *software R* (ver rotina adotada em Apêndice C). O histograma de frequências (Figura 77a) apresenta um contorno que segue, aproximadamente, o formato de sino da curva de distribuição normal. Na distribuição de caixas (Figura 77b) verifica-se a variação dos dados amostrais, com a distribuição de 50% dos resultados de resistência à tração intacto no intervalo interquartil entre 56,4 kN/m e 56,9 kN/m (Q1 e Q3, respectivamente), mediana igual a 56,8 kN/m e a ausência de resultados atípicos (ou espúrios), comportamento esperado devido ao baixo resultado de coeficiente de variação verificado nos resultados intactos (Tabela 12).

A Tabela 13 sumariza os parâmetros obtidos para o teste de aderência à distribuição normal, assim como a análise por gráfico Q-Q normal (Figura 78) ambos realizados no *software R*.

Figura 77 - Distribuição dos resultados amostrais do geotêxtil tecido de polipropileno no sentido longitudinal.



(a) Histograma de frequências.



(b) Diagrama de caixas

Fonte: a autora.

Tabela 13 - Teste de aderência à distribuição normal, com nível de confiança de 95%, a partir dos dados amostrais do geotêxtil tecido de polipropileno no sentido longitudinal.

Parâmetros	Shapiro-Wilk (W)	Kolmogorov-Smirnov (D)
Estatística de teste calculado	0,937	0,175
Estatística de teste tabelado	0,842	0,409
p-valor	0,52	0,91
Parecer	H_0 não rejeitada	H_0 não rejeitada
	$W_{\text{calculado}} > W_{\text{tabelado}}$	$D_{\text{calculado}} < D_{\text{tabelado}}$
	p-valor > 0,05	p-valor > 0,05

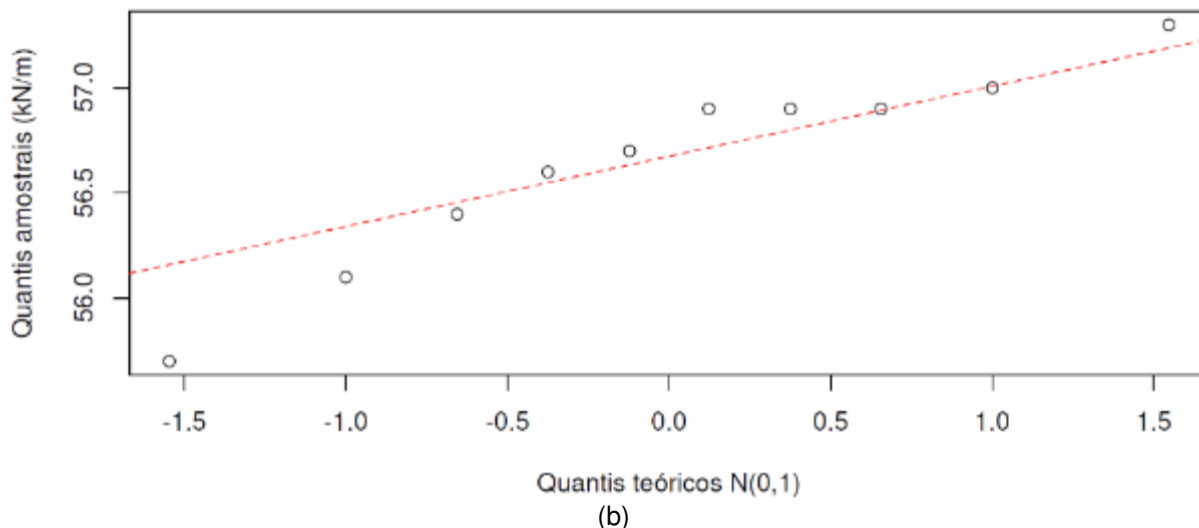
Fonte: a autora.

Em consulta ao valor crítico tabelado, na literatura, igual a 0,842 (número de dados igual a 10 e nível de confiança de 95%), o valor da estatística de teste W obtido de 0,937 é maior do que o valor crítico tabelado, assim como o p-valor superior a 0,05, infere-se que a hipótese de normalidade (H_0) não pode ser rejeitada. Para o teste de aderência por Kolmogorov-Smirnov, também não há evidências de se rejeitar H_0 , uma vez que o resultado D obtido (0,175) é menor do que o valor tabelado crítico (0,409), bem como o p-valor obtido superior a 0,05.

A análise Q-Q normal (Figura 78) refere-se a um gráfico de probabilidade com a distribuição por quantis dos dados amostrais no eixo vertical (kN/m) por uma distribuição normal padrão teórica no eixo horizontal $[N(0,1)]$. Por meio deste, a obtenção da distribuição linearmente relacionada à reta traçada sugere, graficamente,

que o conjunto de dados amostrais de caracterização longitudinal se aderem à distribuição normal.

Figura 78 - Teste de normalidade por gráfico Q-Q normal.



Fonte: a autora.

Deste modo, a princípio não há evidências de se rejeitar H_0 , de modo que o conjunto de dados amostrais de resistência à tração intactos, no sentido longitudinal de fabricação, são aproximadamente provenientes de uma distribuição normal, com nível de confiança de 95%. A partir das análises supracitadas, os resultados amostrais em termos de resistência à tração retidos, em cada condição de teste de durabilidade, foram ponderados por análises estatísticas paramétricas.

5.2 CÁLCULO DO TAMANHO AMOSTRAL

A Tabela 14 apresenta os resultados para a definição do número de corpos de prova que deverão ser obtidos em cada uma das amostras submetidas aos ensaios de durabilidade por intemperismo e as condições de sinergismo. Os cálculos foram realizados mediante a estimativa do erro a ser considerado, bem como dos parâmetros de caracterização por resistência à tração no sentido longitudinal.

À medida que se diminui os valores de precisão da estimativa (e), ou seja, maior precisão ($\pm 1\%$) e menor o erro, torna-se necessário aumentar o número de corpos de prova a serem ensaiados para cada uma das condições de testes de durabilidade. A partir dos parâmetros obtidos na caracterização mecânica do geotêxtil empregado na pesquisa (Tabela 12), fixou-se precisão de estimativa igual a 1% com a extração de 10 corpos de prova aleatórios nas amostras expostas às condições experimentais.

Tabela 14 - Estimativa do número de corpos de prova para ensaios de durabilidade do geotêxtil tecido de polipropileno.

Parâmetros	Resultados
Valor médio	56,7 kN/m
Desvio padrão	0,5 kN/m
$t_{(n-1); \alpha/2} = (t_{9; 0,025})$	2,262
Precisão da estimativa (e)	Número mínimo de corpos de prova (N)
1%	3,98 = 4
2%	0,99 = 1

Fonte: a autora.

5.3 DURABILIDADE POR INTEMPERISMO

5.3.1 Tratamento estatístico dos parâmetros meteorológicos

A Tabela 15 sumariza os parâmetros meteorológicos registrados durante os períodos de exposição ao intemperismo (Tabela 8). Na Figura 79, tem-se as distribuições temporais.

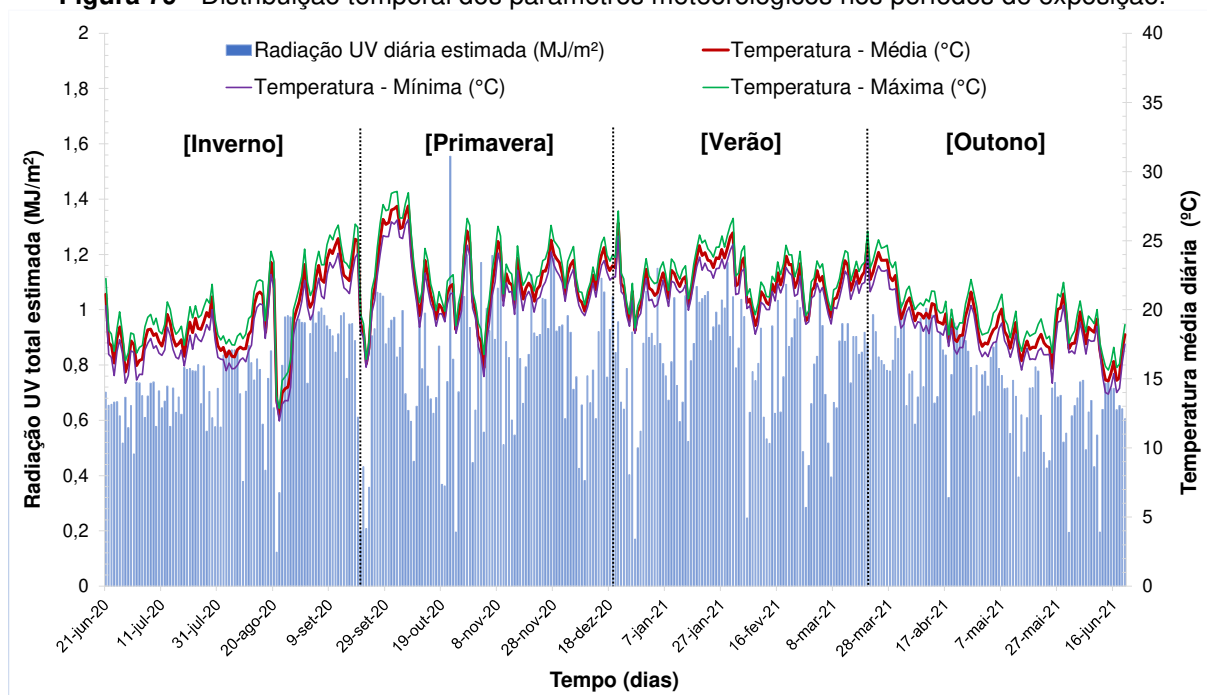
Tabela 15 - Resumo dos parâmetros meteorológicos nos períodos de ensaio.

Período ¹	Radiação solar global (MJ/m ²)	Radiação UV total estimada (MJ/m ²) ²	Temperatura média (°C) ³	Umidade relativa do ar média (%) ³	Precipitação total (mm)
I	1.716,2	72,1	20,1 ± 2,8	56,7 ± 12,6	49,4
P	1.748,8	73,5	21,8 ± 2,5	70,7 ± 12,7	69,8
V	1.768,7	74,3	22,2 ± 1,6	73,8 ± 10,0	214,8
O	1.485,7	62,4	17,9 ± 2,1	70,1 ± 7,7	70,8
I + P	3.465,0	145,6	21,0 ± 5,0	63,7 ± 21,4	119,2
I + P + V	5.235,9	219,9	21,4 ± 4,6	67,1 ± 20,6	334,0
I + P + V + O	6.719,4	282,3	20,5 ± 4,8	67,8 ± 20,1	404,8

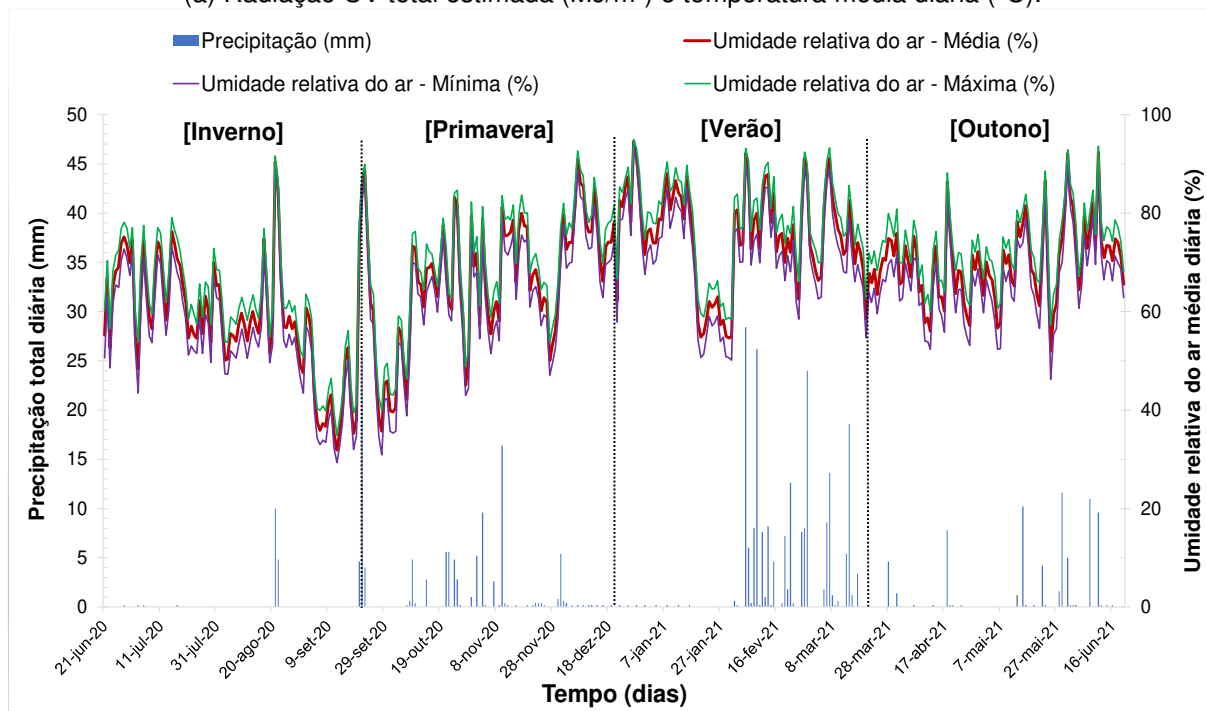
OBSERVAÇÃO: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²Estimativa baseada em 4,2% da radiação solar global; ³Desvio padrão (±).

Fonte: a autora.

Verifica-se que a incidência de radiação solar global, assim como da radiação UV estimada, foi similar entre as estações climáticas inverno, primavera e verão e menor durante o outono (Tabela 15). Na Figura 80a, é possível visualizar as suas respectivas distribuições percentuais, com maior percentual de radiação UV estimado atribuído ao verão (26,3%). Os aumentos de radiação UV estimadas entre as estações climáticas, no período analisado, foram graduais e lineares (Figura 81), com uma ligeira redução apenas entre 273 dias e 365 dias, contudo com a manutenção de linearidade. As incidências de radiação UV culminam diretamente em possíveis perdas de propriedades mecânicas por fotodegradação, considerado como o principal fator de degradação por intemperismo. Contudo, esse fator não pode ser analisado de forma isolada, mas sim no contexto da dinâmica climática dentre os períodos de exposição em campo.

Figura 79 - Distribuição temporal dos parâmetros meteorológicos nos períodos de exposição.

(a) Radiação UV total estimada (MJ/m²) e temperatura média diária (°C).



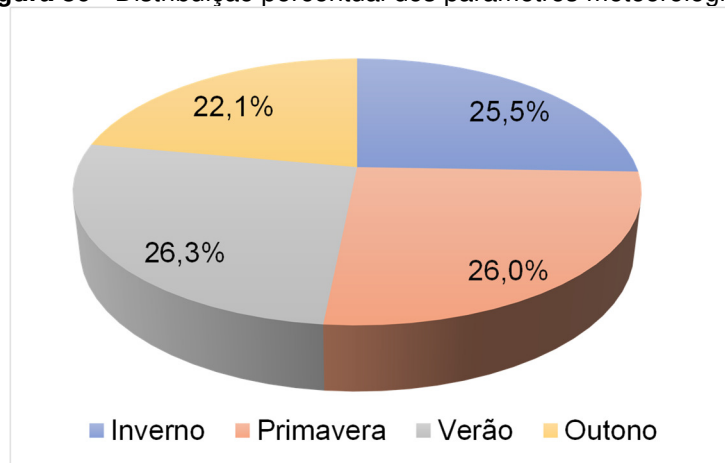
(b) Precipitação total diária (mm) e umidade relativa do ar média diária (%).

Fonte: a autora.

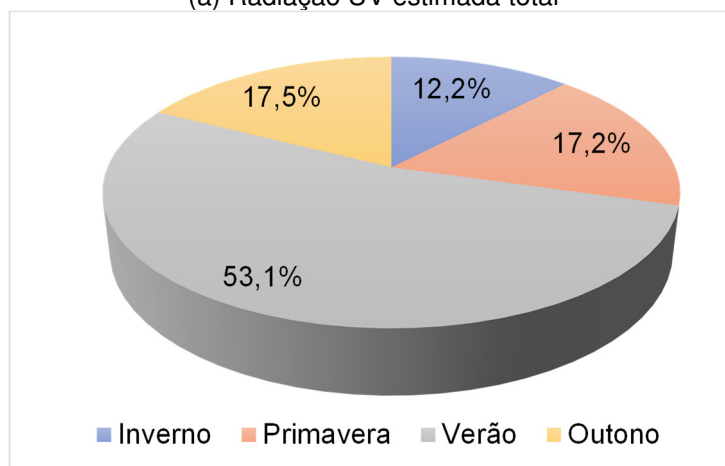
Baixos índices pluviométricos foram registrados durante o inverno (Figura 79b), o qual correspondeu a apenas 12,2% do total registrado entre o início do inverno de 2020 a final de outono de 2021 (Figura 80b), cujo total acumulado de 49,4 mm correspondeu a apenas 9 dias de chuvas. A dinâmica climática reportada culminou no acúmulo de partículas sólidas sobre a superfície dos geotêxteis expostos ao

intemperismo, conforme apresentado na Figura 82. Isto possivelmente atuou como fator de proteção à incidência de radiação solar na superfície das amostras.

Figura 80 - Distribuição percentual dos parâmetros meteorológicos.



(a) Radiação UV estimada total

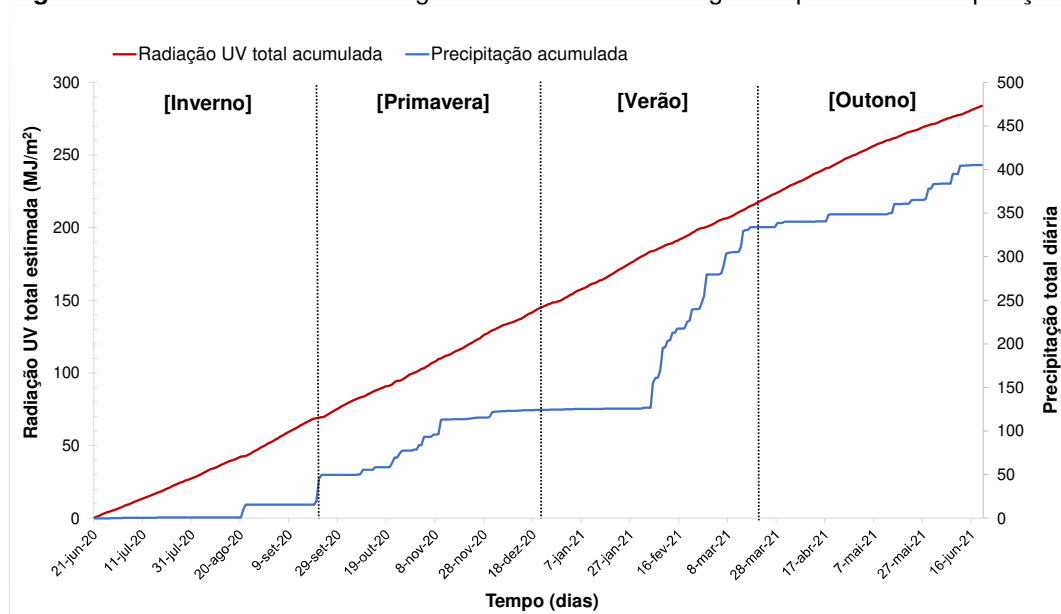


(b) Precipitação total acumulada.

Fonte: a autora.

Maiores índices pluviométricos foram registrados nas estações climáticas de verão (214,8 mm), cuja parcela de 53,1% (Figura 80b) foi distribuída em 39 dias de registros pluviométricos, com os maiores volumes pluviométricos registrados em fevereiro/2021 (Figura 79b). Destaca-se as similaridades quanto às precipitações totais acumuladas nas estações de primavera (17,2%) e outono (17,5%), com diferença apenas quanto ao total de dias de chuva. Foram registrados 25 dias com índices pluviométricos no outono e 39 dias na primavera. Deste modo, os registros pluviométricos acumulados foram não lineares, conforme apresentado na Figura 81.

Para inferência da durabilidade por intemperismo de materiais poliméricos, as precipitações atuam como um fator de choque térmico pela redução da temperatura na superfície dos materiais expostos, de forma macro, em comparação a temperatura incidente nos picos máximos diários.

Figura 81 - Parâmetros meteorológicos acumulados ao longo dos períodos de exposição.

Fonte: a autora.

Figura 82 - Acúmulo de partículas sólidas sobre as amostras expostas ao intemperismo registrado no dia 17/08/2020.

(a) Exposição aberta.

(b) Fluência à tração e intemperismo simultâneos
Fonte: a autora.

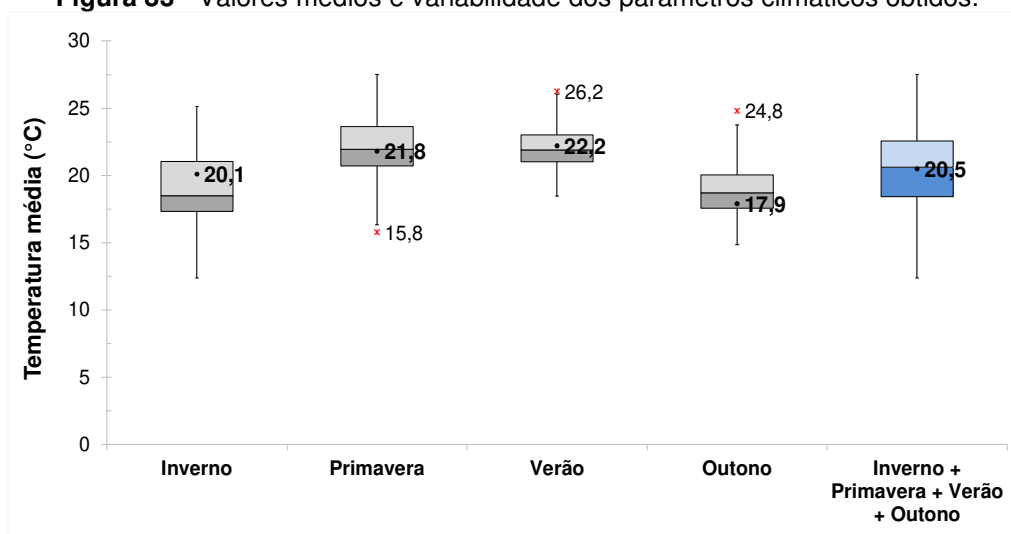
Os maiores índices pluviométricos observados no verão é um comportamento típico observado no verão brasileiro na região Sudeste, bem como os baixos índices registrados no inverno. Contudo, é importante destacar que a dinâmica climática não se mantém constante ao se comparar os registros dos parâmetros meteorológicos entre estações climáticas e anos subsequentes. Ao se analisar o comportamento climático quanto a média anual de 1336 mm de pluviosidade (Figura 60b) típico para a cidade de Varginha, analisada nesta pesquisa, distintos são os fatores que podem alterar a dinâmica climática, como o registro total de 404,8 mm durante os 365 dias analisados (Tabela 15), inferior ao total esperado. As referidas hipóteses que possam elucidar as diferenças entre os comportamentos típicos esperados, a partir de registros históricos reportados na literatura, e os dados registrados não são objetos de estudo deste trabalho.

Em termos de temperatura média diária, ocorreram ligeiros aumentos entre o inverno e verão com posterior diminuição durante o outono (Figura 79a). Maior variabilidade de temperatura ocorreu no inverno, ou seja, maiores choques térmicos durante o dia, e menor variabilidade durante o verão (Figura 83). Ou seja, as amostras expostas no verão receberam maior incidência de calor durante o dia. A temperatura média diária incidente para o período total acumulado de 365 dias foi igual a $20,5^{\circ}\text{C}^{10}$ (Tabela 15) e o desvio padrão similar ao observado para o período do outono (Figura 83a). Este elemento climático é de suma importância, uma vez que a temperatura atua como catalizador de reações químicas, como na fotodegradação. Maiores incidências de radiação solar e temperaturas médias diárias podem corroborar em maiores perdas de resistência à tração por intemperismo.

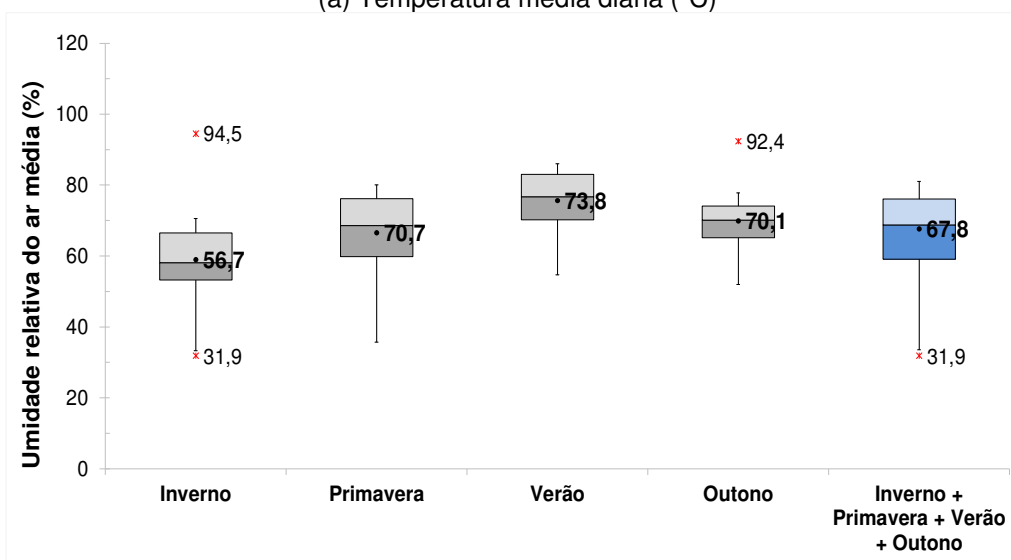
Salienta-se que os valores indicados fora dos intervalos interquartis (Figura 83) correspondem a registros meteorológicos atípicos obtidos durante os períodos de exposição, cujas dinâmica climática foram apresentadas anteriormente (Figura 79).

Ademais, é necessário ponderar sobre as amplitudes térmicas, que correspondem a variações térmicas observadas durante o dia, apresentada na Figura 84.

¹⁰ Conforme pesquisa preliminar reportada na Figura 19 (GUIMARÃES *et al.*, 2020), medidas de temperatura obtidas diretamente na superfície das amostras de geotêxteis são maiores do que as leituras registradas na estação meteorológica ao meio-dia (maior incidência de radiação solar). Para o contexto de influência da dinâmica climática na durabilidade de geossintéticos por intemperismo, deve-se considerar a ocorrência deste fenômeno. Tais medidas de temperatura não foram obtidas nesta pesquisa uma vez que os ensaios experimentais foram realizados durante período de isolamento social devido a pandemia do novo coronavírus (Sars-Cov-2).

Figura 83 - Valores médios e variabilidade dos parâmetros climáticos obtidos.

(a) Temperatura média diária (°C)



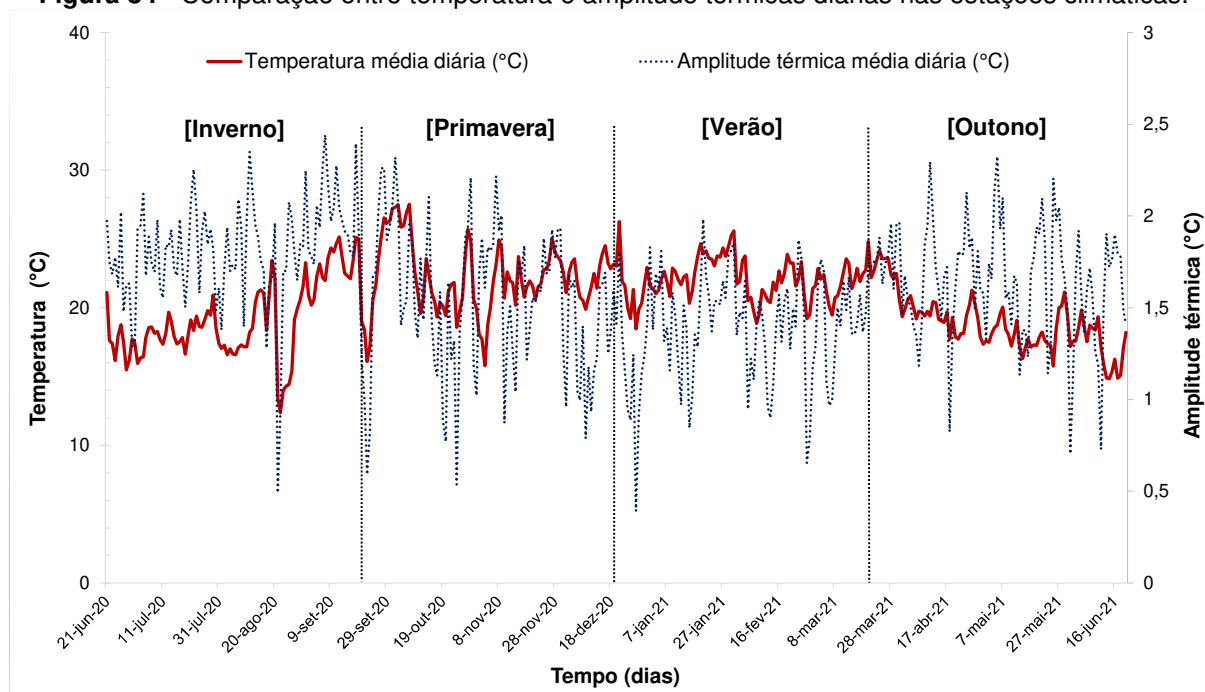
(b) Umidade relativa do ar (%).

Fonte: a autora.

Menores amplitudes térmicas diárias foram observadas no verão e maiores no inverno, com valores médios de 1,4°C e 1,8°C, respectivamente. De forma direta, pode-se inferir que as amostras expostas no inverno sofreram maiores choques térmicos ao longo do tempo, cuja estação climática é característica por temperaturas baixas no início da manhã e final de tarde e maiores temperaturas térmicas no meio do dia. Além disso, devido o verão ter apresentado menores amplitudes térmicas diárias, amostras expostas neste período receberam maior incidência de calor durante o dia, cuja relação também pode ser feita com maiores irradiâncias (MJ/m²) solar global e, conseqüentemente, de radiação UV (Tabela 15). Contudo, este parâmetro também não pode ser analisado separadamente, mas sim em conjunto a

incidência de radiação solar e nebulosidades diárias, esta última não foi objeto de inferência neste trabalho.

Figura 84 - Comparação entre temperatura e amplitude térmicas diárias nas estações climáticas.



Fonte: a autora.

Quanto à umidade relativa do ar, verão caracterizou-se com maior média diária igual a 73,8% (Tabela 15) e menor variabilidade (Figura 83b), que pode estar relacionada a maiores índices pluviométricos observados nesta estação climática, bem como o inverno com menor média diária e maior desvio padrão ($56,7 \pm 12,6$ %). Este comportamento é devido a ocorrência de orvalhos nos períodos noturno e início do dia, dinâmica climática característica deste período no local de realização dos ensaios. A primavera e o outono apresentaram parâmetros médios semelhantes, porém com maior desvio padrão médio registrado na primavera (Tabela 15). O período total de 365 dias apresentou umidade relativa do ar média igual a 67,8% (Tabela 15).

5.3.2 Parâmetros mecânicos retidos por tempos de exposição

A Tabela 16 apresenta os parâmetros mecânicos obtidos durante os ensaios de durabilidade por intemperismo. Na Tabela 17 tem-se os pareceres referente a aderência dos resultados amostrais à distribuição normal, assim como por análise gráfica Q-Q normal (Figura 85). Ambas as análises atestaram a aderência à distribuição normal (H_0). Assim, os resultados amostrais, em cada condição de teste de durabilidade, foram ponderados por análises estatísticas paramétricas.

Tabela 16 - Parâmetros mecânicos retidos médios após períodos de exposição.

Períodos ¹	Resistência à tração máxima - kN/m ($T_{m\acute{a}x}$) ³	Deformação à carga máxima - % ($\epsilon_{m\acute{a}x}$) ³	Perda de resistência à tração	Módulo em tração - kN/m ($J_{m\acute{a}x}$) ⁴	Tenacidade - kN/m ² ($U_{m\acute{a}x}$) ⁵
Intacto ²	56,7 (0,8%)	14,8 (3,3%)	***	383,1	5154,5
I	40,9 (1,5%)	8,5 (2,4%)	27,8%	481,2	2135,4
P	38,8 (3,4%)	6,9 (3,3%)	31,6%	562,3	1644,5
V	39,7 (2,0%)	8,3 (4,0%)	29,9%	478,3	2024,0
O	43,0 (3,3%)	8,5 (4,1%)	24,1%	505,9	2245,1
I + P	36,3 (2,6%)	7,0 (5,7%)	35,9%	518,6	1560,8
I + P + V	35,2 (2,7%)	6,3 (4,1%)	37,8%	558,7	1362,2
I + P + V + O	33,7 (4,0%)	6,1 (3,5%)	40,5%	552,5	1262,7

OBSERVAÇÕES: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²Parâmetros intactos (sentido longitudinal) apresentado a título de inferências; ³Entre parêntesis os respectivos coeficientes de variação (COV); ⁴Parâmetro obtido em $T_{m\acute{a}x}$. Equivalente ao Módulo de Young para a medida de rigidez de um material sólido (Shukla; Yin, 2006); ⁵Parâmetro obtido em $T_{m\acute{a}x}$. Adotou-se $U = \frac{1}{2} \times (T_{m\acute{a}x} \times \epsilon_{m\acute{a}x} \times 1/\text{espessura})$ como aproximação da área sobre a curva $T_{m\acute{a}x} \times \epsilon_{m\acute{a}x}$ (Koerner, 2005).

Fonte: a autora.

Tabela 17 - Teste de aderência à distribuição normal, com nível de confiança de 95%, para os resultados amostrais de intemperismo.

Resultados amostrais de heterogeneidade:				
Períodos ¹	Shapiro-Wilk (W)		p-valor	Parecer ²
	Estatística de teste calculado			
I	0,858		0,07	H ₀ não rejeitada
P	0,904		0,24	H ₀ não rejeitada
V	0,942		0,57	H ₀ não rejeitada
O	0,986		0,99	H ₀ não rejeitada
I + P	0,903		0,24	H ₀ não rejeitada
I + P + V	0,872		0,10	H ₀ não rejeitada
I + P + V + O	0,907		0,26	H ₀ não rejeitada

OBSERVAÇÕES: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²A partir da estatística de teste tabelado ($W_{\text{tabelado}} = 0,842$), H₀ não é rejeitada se: $W_{\text{calculado}} > W_{\text{tabelado}}$ e p-valor > 0,05.

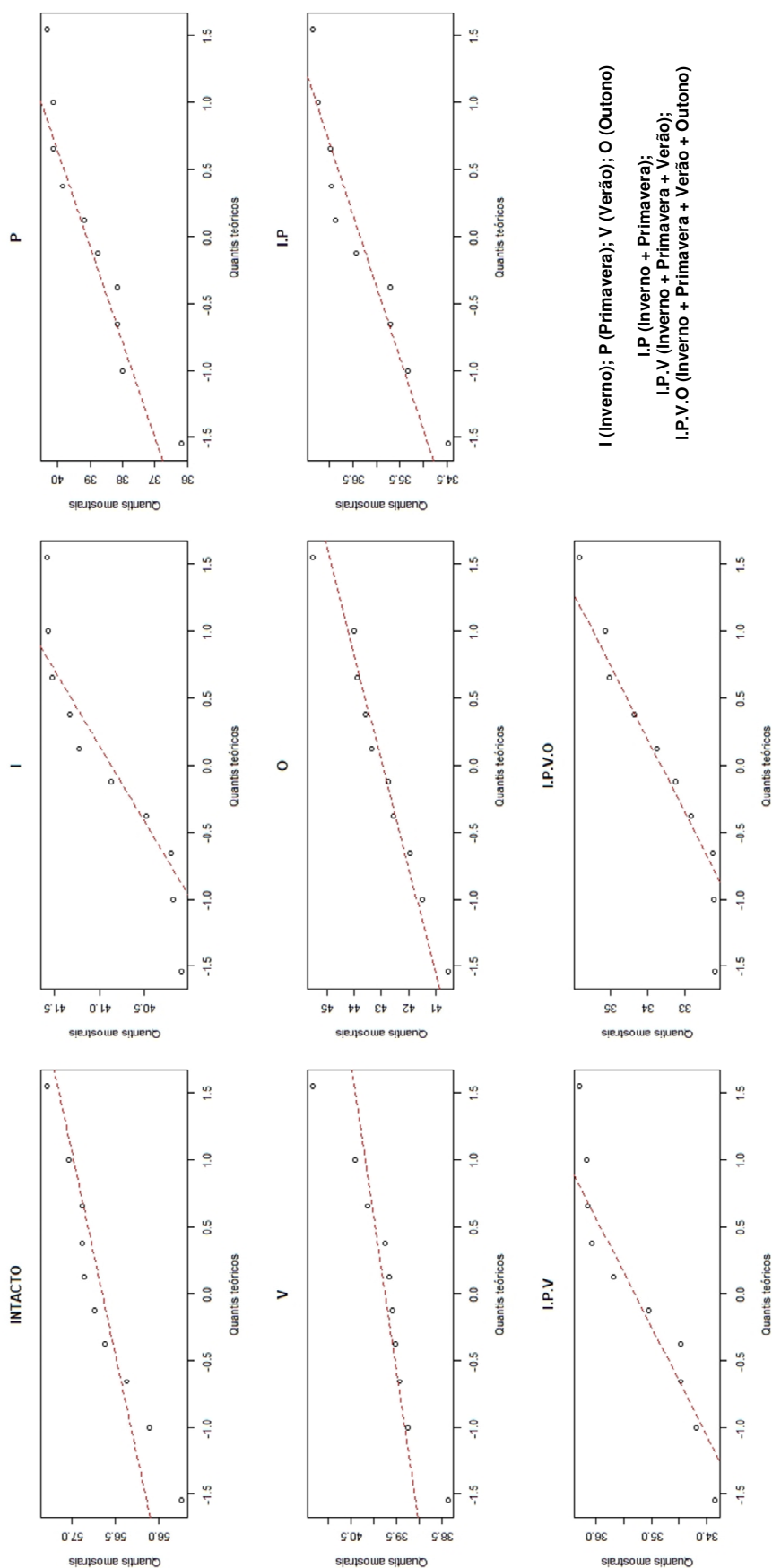
Kolmogorov-Smirnov (D)				
Períodos ¹	Estatística de teste calculado	p-valor	Parecer ²	
I	0,199	0,74	H ₀ não rejeitada	
P	0,168	0,93	H ₀ não rejeitada	
V	0,200	0,74	H ₀ não rejeitada	
O	0,135	0,98	H ₀ não rejeitada	
I + P	0,224	0,693	H ₀ não rejeitada	
I + P + V	0,215	0,739	H ₀ não rejeitada	
I + P + V + O	0,155	0,939	H ₀ não rejeitada	

OBSERVAÇÕES: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²A partir da estatística de teste tabelado ($W_{\text{tabelado}} = 0,842$), H₀ não é rejeitada se: $W_{\text{calculado}} > W_{\text{tabelado}}$ e p-valor > 0,05.

Fonte: a autora.

A Figura 86 apresenta as curvas médias de resistência à tração (kN/m) por deformação (%) obtidas para os períodos de exposição. Verificam-se perdas de resistência à tração em todos os períodos de exposição, que culminaram em deslocamentos das curvas médias de resistências à tração por deformação à esquerda em comparação ao geotêxtil intacto.

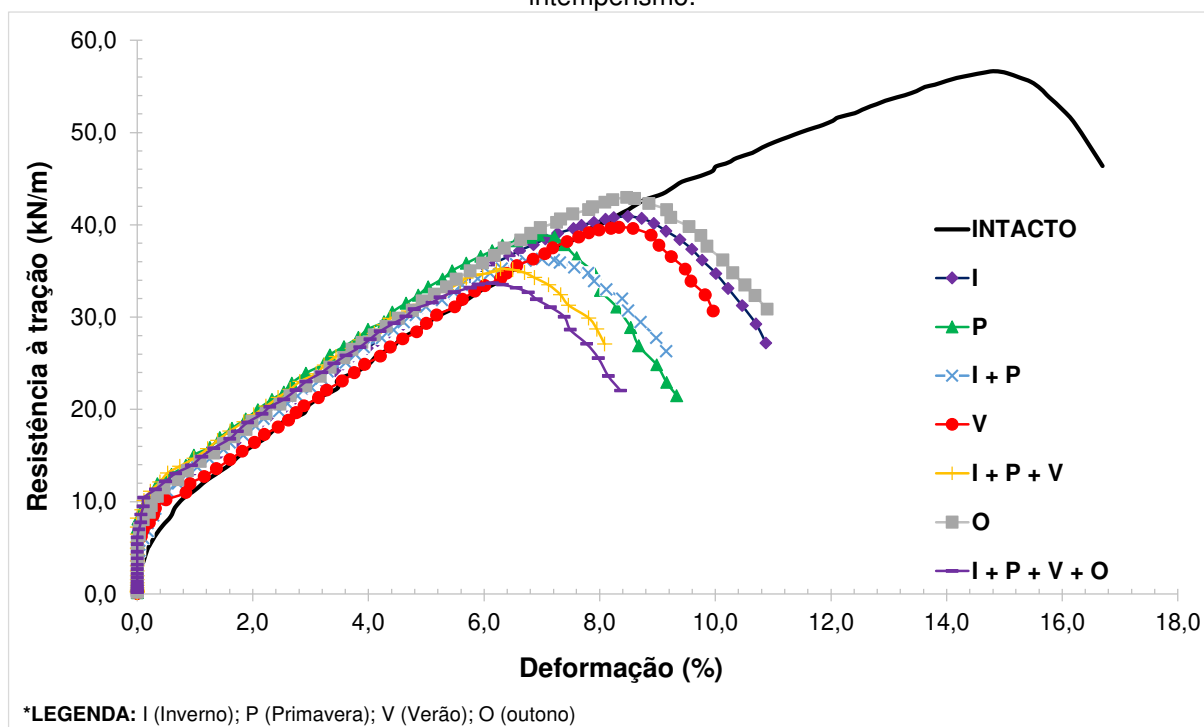
Figura 85 - Teste de aderência por gráfico Q-Q normal para os resultados amostrais de intemperismo.



I (Inverno); P (Primavera); V (Verão); O (Outono)
 I.P (Inverno + Primavera);
 I.P.V (Inverno + Primavera + Verão);
 I.P.V.O (Inverno + Primavera + Verão + Outono)

Fonte: a autora.

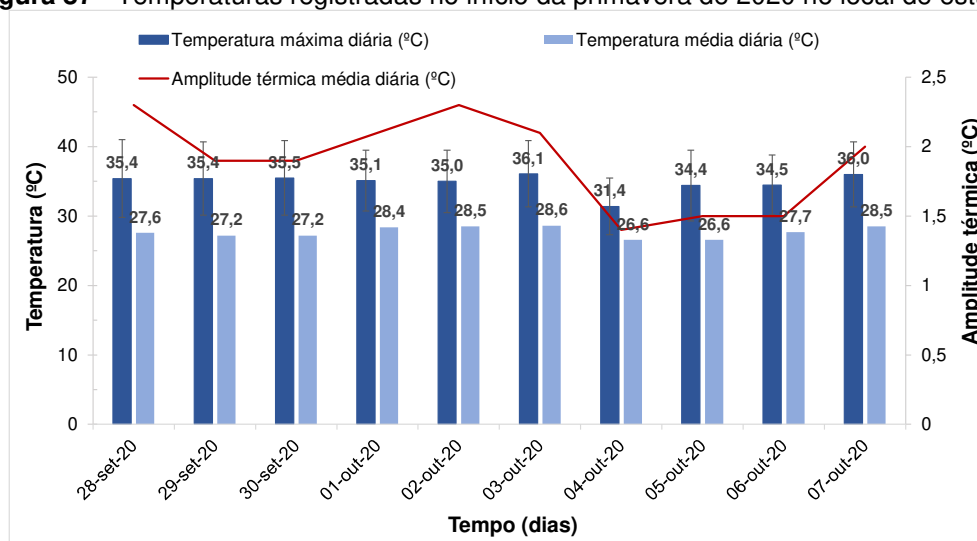
Figura 86 - Curvas médias de resistência à tração por deformação para os períodos de exposição por intemperismo.



Fonte: a autora.

Menores perdas de resistência foram obtidas no período de outono, seguidos pelo inverno, verão e primavera, respectivamente. Como discutido no tópico anterior, a dinâmica climática registradas na primavera e no verão foram similares em termos de temperatura média e radiação UV estimada. A diferença percentual de perda de resistências mecânicas médio de 1,5% e os respectivos coeficientes de variação indicam comportamentos similares de durabilidade entre os períodos de primavera e verão. Contudo, observou-se o deslocamento da curva média obtida na primavera em relação ao verão (Figura 86), cujo comportamento é dependente da dinâmica climática. Os menores índices pluviométricos na primavera, em comparação ao verão, podem ter culminado em períodos com menores nebulosidades e, assim, a ação direta da radiação solar incidente na superfície das amostras. Além disso, o início da primavera de 2020 foi caracterizado por ondas de calor em todo o território brasileiro. Conforme indicado na Figura 87, entre os dias 28/09/2020 e 07/10/2020 foram registradas temperaturas máximas diárias superiores a 31,0 C°, com média no período de 34,8°C.

Para os períodos acumulados, observou-se diminuição de resistências à tração retidos e as respectivas deformações à carga máxima, com perdas de resistências médias de 40,5% no período total (365 dias), assim como deslocamentos à esquerda das curvas médias de resistência à tração *versus* deformação (Figura 86).

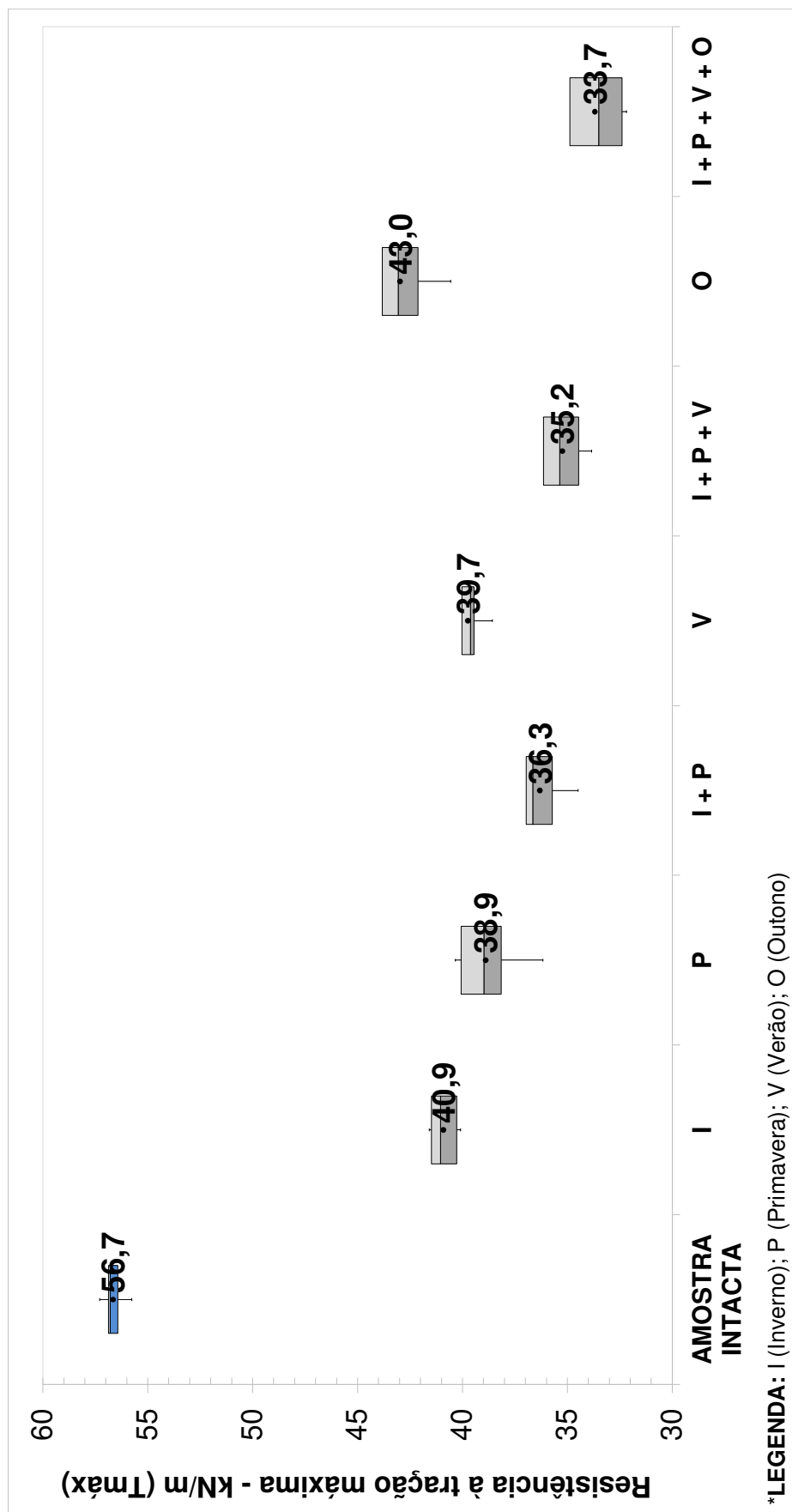
Figura 87 - Temperaturas registradas no início da primavera de 2020 no local de estudo.

Fonte: a autora.

Destaca-se similaridades entre as curvas obtidas nos períodos de primavera e inverno + primavera, o qual indica a influência do período de exposição primavera no comportamento mecânico para o período acumulado supracitado. Além disso, observam-se aumentos nos módulos em tração (ou rigidez) em todas as amostras expostas ao intemperismo em comparação ao parâmetro intacto (383,1 kN/m). Para os períodos de exposição não acumulados, este parâmetro foi maior na primavera (562,3 kN/m) e aumentos graduais entre os três intervalos de exposição acumulados (Tabela 16). Devido ao maior coeficiente de variação observado para $T_{\text{máx}}$ aos 365 dias, em comparação ao período acumulado anterior, infere-se uma similaridade dos módulos de tração obtidos para os dois últimos períodos acumulados de exposição. Os aumentos nos módulos em tração supramencionados também foram observados em análises tátil-visuais na retirada das amostras em exposição, com aspectos de ressecamento e desbotamento. Isto justifica-se para dinâmica climática de maiores índices, principalmente, de radiação solar global e temperaturas médias. Em termos de tenacidade, observam-se a sua diminuição em relações opostas às perdas de resistência à tração obtidas e aos aumentos supramencionados dos módulos em tração.

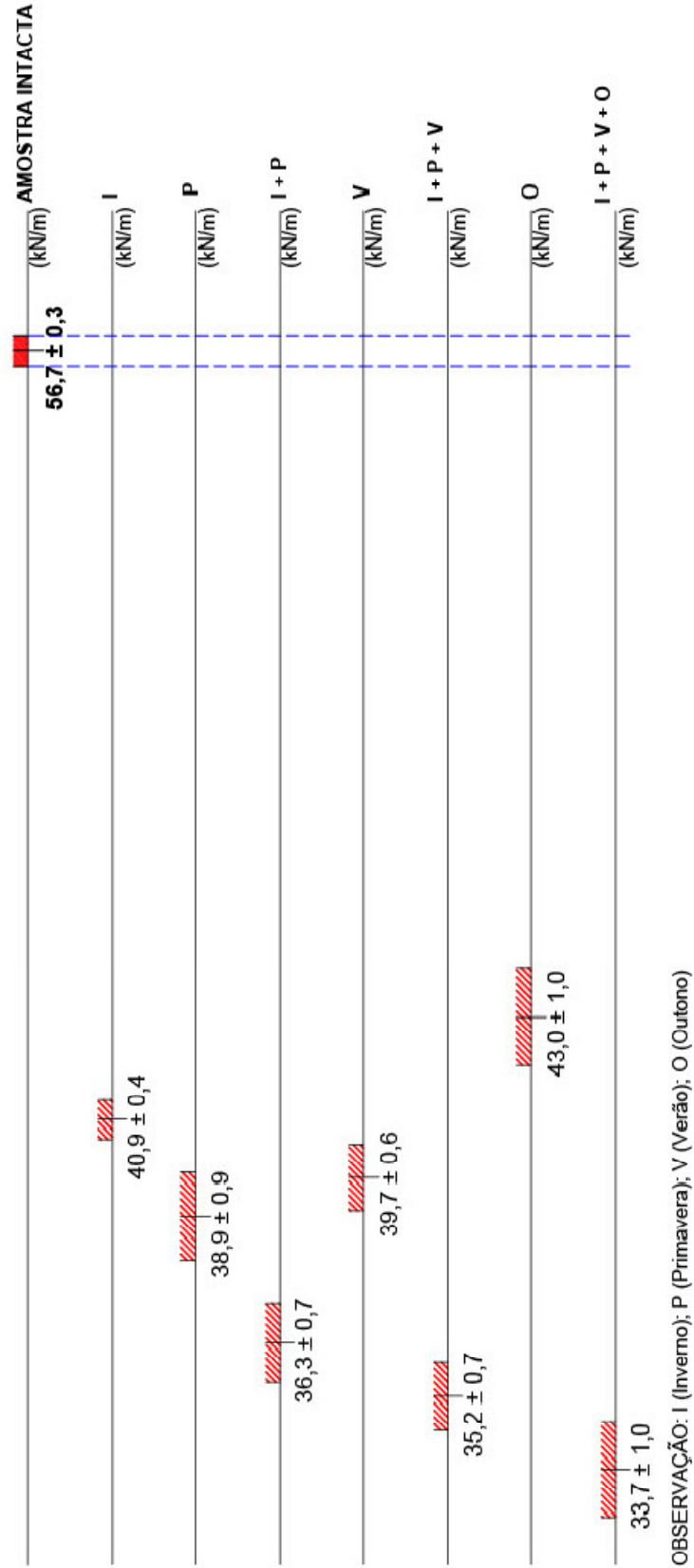
A Figura 88 apresenta a distribuição dos resultados amostrais por diagrama de caixas para todos os períodos de exposição analisados. Na Figura 89, tem-se o tratamento estatístico por intervalos de confiança (ICs), para um nível de confiança de 95%, com a obtenção dos valores médios populacionais em todos os períodos de exposição.

Figura 88 - Diagrama de caixas nos períodos de exposição ao intemperismo.



Fonte: a autora.

Figura 89 - Intervalo de confiança (IC), com nível de confiança de 95%, para os resultados de resistência à tração retidos (kN/m) nos períodos de exposição por intemperismo.



Fonte: a autora.

Verifica-se a distribuição dos resultados entre o intervalo interquartil e, praticamente, a ausência de maiores faixas entre os limites inferior e superior, o qual evidencia uma menor dispersão entre os resultados, condizentes com os baixos valores de COV indicados na Tabela 16, assim como a ausência de valores atípicos (ou espúrios). Para as demais análises paramétricas e probabilísticas, serão considerados todo o conjunto de dados amostrais, ou seja, sem a necessidade de exclusão de algum resultado amostral obtido. Além disso, os valores médios são próximos às respectivas medianas, assim como todos os intervalos interquartil abaixo do intervalo interquartil referente aos dados amostrais de caracterização (amostra intacta).

A média populacional (μ) indica que as resistências à tração para os períodos de exposições estão deslocadas à esquerda do IC para a amostra intacta ($54,8 < \mu < 57,5$ kN/m). Os ICs indicam apenas um ligeiro aumento na dispersão dos resultados em comparação à faixa intervalar para o geotêxtil intacto devido às alterações mecânicas ocorridas pela exposição ao intemperismo. Este comportamento também foi verificado por análise interquartil por diagrama de caixas. Conforme esperado, ICs com maiores deslocamentos à esquerda foram observados para os períodos de exposição acumulados. Enfatiza-se que os resultados obtidos para o intemperismo isoladamente serão importantes para a compreensão do comportamento de durabilidade por fluência à tração e intemperismo simultaneamente.

A Figura 90 apresenta os modelos matemáticos que melhor descrevem a resistência à tração máxima (kN/m) e perdas de resistências à tração (%) em função das incidências de radiação UV estimadas (MJ/m²) para os períodos acumulados e avaliados nas condições de estudo. Como destacado anteriormente, a escolha pela variável radiação UV estimada não exclui a influência dos demais parâmetros meteorológicos na dinâmica climática em análise.

Em ambas as análises, obteve-se modelos matemáticos linear-log (coeficiente de determinação R^2 igual a 98%) que melhor se ajustaram aos resultados amostrais obtidos por regressão linear. Para a variável Y de resistência à tração máxima, analisa-se a Equação 44:

$$Y = -a \ln(X) + b \quad (44)$$

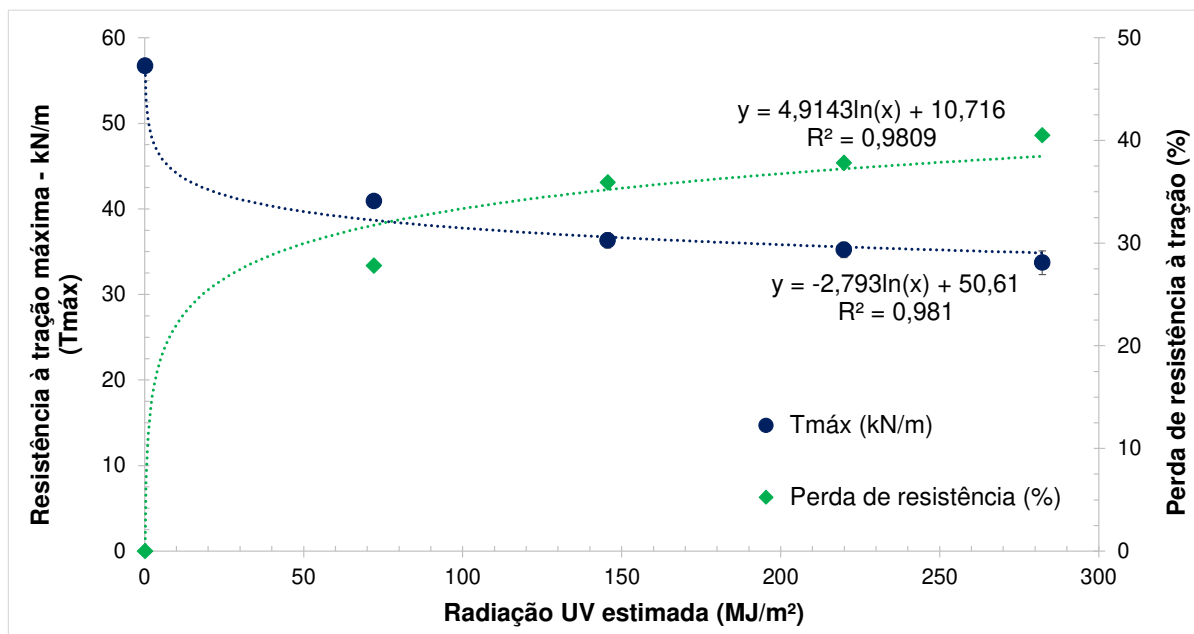
Dado que:

Y = resistência à tração máxima (kN/m);

X = radiação UV estimada (MJ/m²) na dinâmica climática analisada;

a e b = coeficientes dependentes da resistência à tração característica do geotêxtil tecido de polipropileno analisado.

Figura 90 - Comportamento de resistência à tração retida máxima (kN/m) por radiação UV estimada (MJ/m²).



Fonte: a autora.

5.4 DURABILIDADE POR SINERGISMO DE FLUÊNCIA À TRAÇÃO E INTemperismo

5.4.1 Deformações por fluência ao longo do tempo de exposição

A Tabela 18 sumariza as deformações por fluência à tração obtidas a partir de leituras realizadas nas áreas delimitadas no geotêxtil (Figura 68). Para as amostras expostas no período de inverno + primavera + verão + outono, as leituras encerraram-se no dia 22/03/2021 (275 dias) devido aos desbotamentos ocorridos nas marcações realizadas na superfície dos geotêxteis (Figura 91)¹¹. Contudo, tais amostras permaneceram em exposição até o término do outono/2021.

¹¹ Em ensaios preliminares, realizaram-se testes de marcações nas áreas dos geotêxteis pelo uso de linhas de poliéster, empregadas em costuras e emendas de geotêxteis em campo, que foram trançadas nas tramas do geotêxtil tecido para medidas de deformações por fluência à tração nas superfícies das amostras. Contudo, não se obteve sucesso neste tipo de marcação, uma vez que as linhas traçadas na trama dos geotêxteis não se deformaram conjuntamente às amostras de geotêxteis sob fluência à tração.

Tabela 18 - Deformação final média por fluência à tração e intemperismo ($\epsilon_{\text{fluência}}$).

Períodos ¹	Réplicas	Sentido longitudinal (%) ²	Sentido transversal (%) ²
I	R1	7,8 (4,3%)	-4,1 (7,8%)
	R2	7,3 (6,6%)	-4,0 (10,5%)
P	R1	8,5 (3,7%)	-4,8 (1,8%)
	R2	8,7 (3,6%)	-4,9 (4,1%)
V	R1	9,6 (3,9%)	-4,8 (2,5%)
	R2	9,8 (3,6%)	-5,0 (7,7%)
O	R1	8,0 (5,7%)	-4,0 (7,5%)
	R2	8,3 (7,8%)	-3,9 (9,9%)
I + P	R1	8,0 (7,2%)	-5,0 (7,7%)
	R2	8,3 (3,2%)	-5,5 (4,1%)
I + P + V	R1	9,1 (6,3%)	-6,0 (7,5%)
	R2	9,0 (3,1%)	-5,7 (4,3%)
I + P + V + O ³	R1	8,7 (6,1%)	-6,1 (1,0%)
	R2	9,2 (4,0%)	-6,3 (5,5%)

OBSERVAÇÕES: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²Entre parêntesis os respectivos coeficientes de variação; ³Última leitura realizada em 22/03/2021 (total de 275 dias).

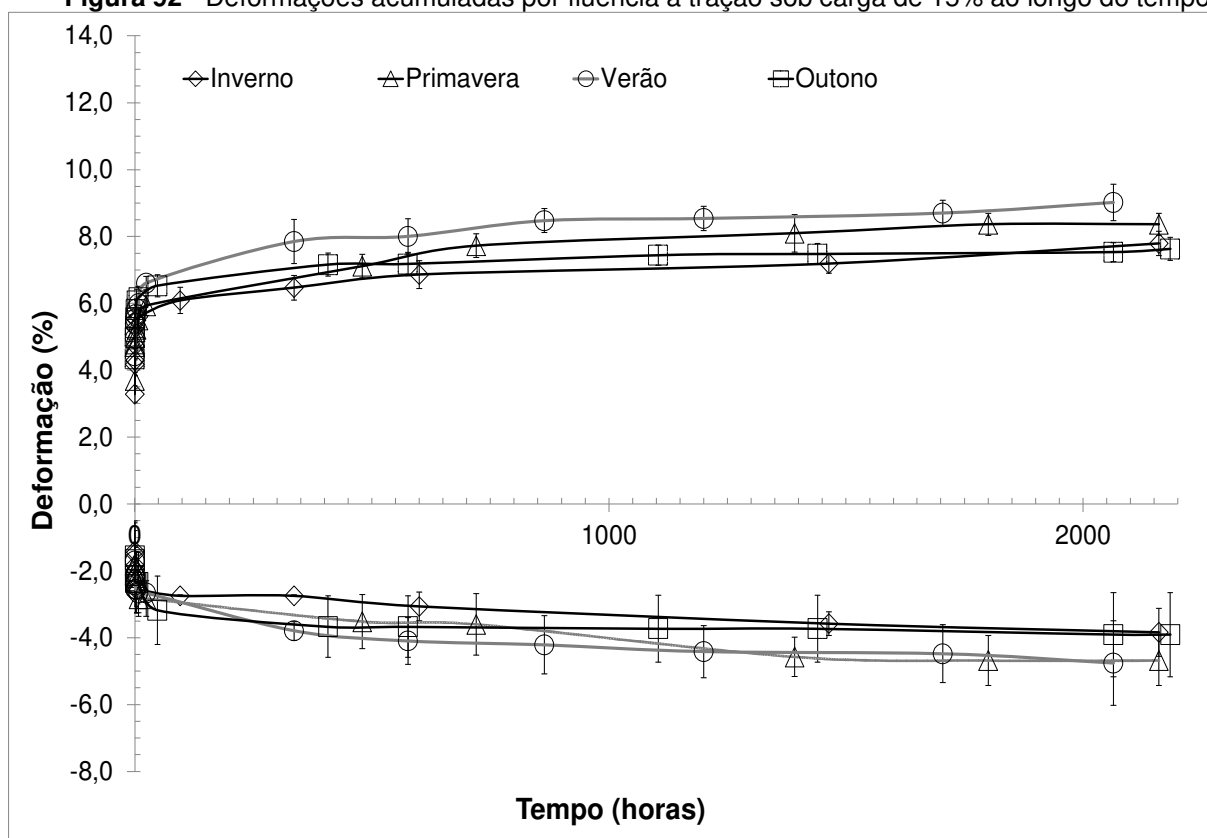
Fonte: a autora.

Figura 91 - Desbotamento das áreas delimitadas no geotêxtil nas amostras expostas com tempo acumulado de inverno + primavera + verão + outono.

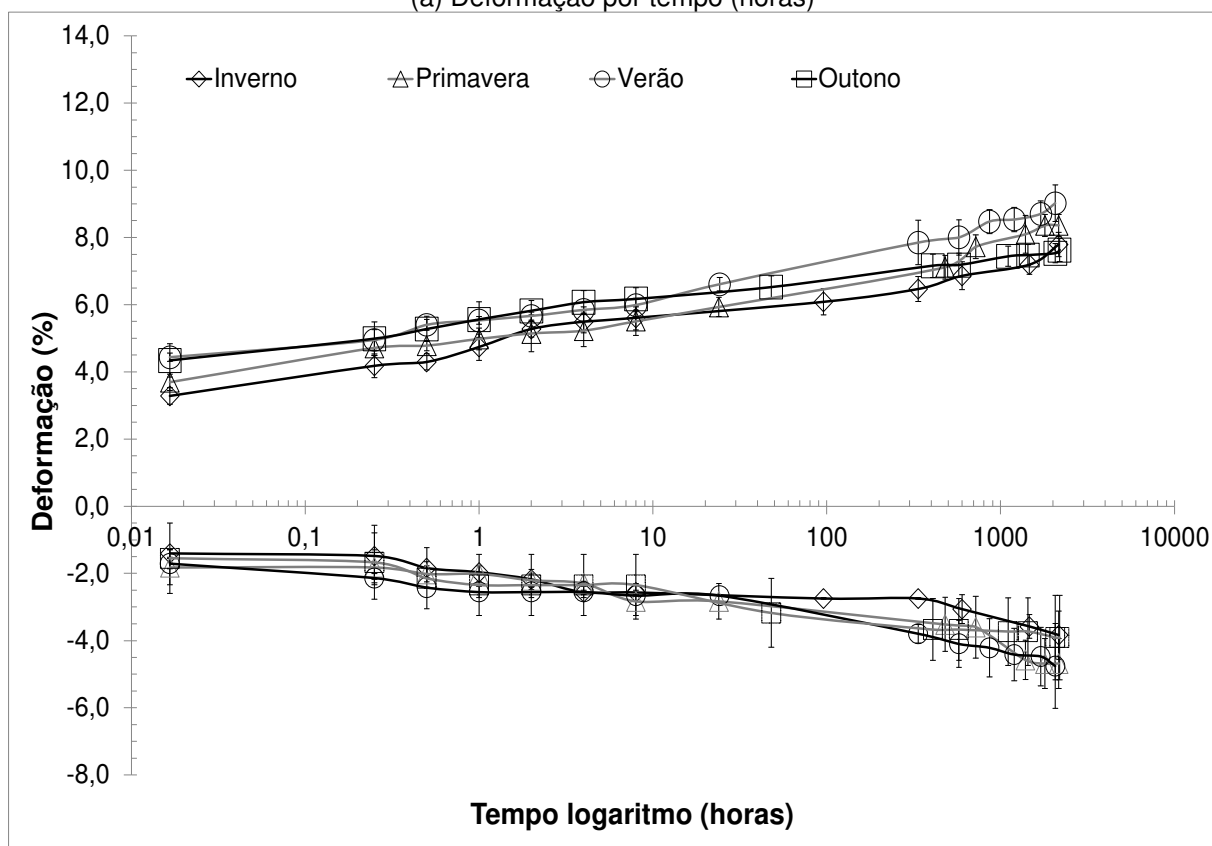
Fonte: a autora.

A Figura 92 apresenta as curvas de deformações acumuladas por fluência por tempo para os períodos isolados de estações climáticas. Na Figura 93 tem-se as curvas referentes aos períodos acumulados. Para melhor inferência, foram incluídos os intervalos de desvios padrão entre as leituras pelo uso de paquímetro digital. Ressalta-se que as deformações positivas se referem a leituras realizadas no sentido longitudinal e as deformações negativas no sentido transversal, conforme deformações finais médias indicadas na Tabela 18¹².

¹² Foram apresentadas curvas de deformações por fluência à tração e intemperismo por tempo de apenas uma das réplicas analisadas, com o intuito de facilitar a sua visualização.

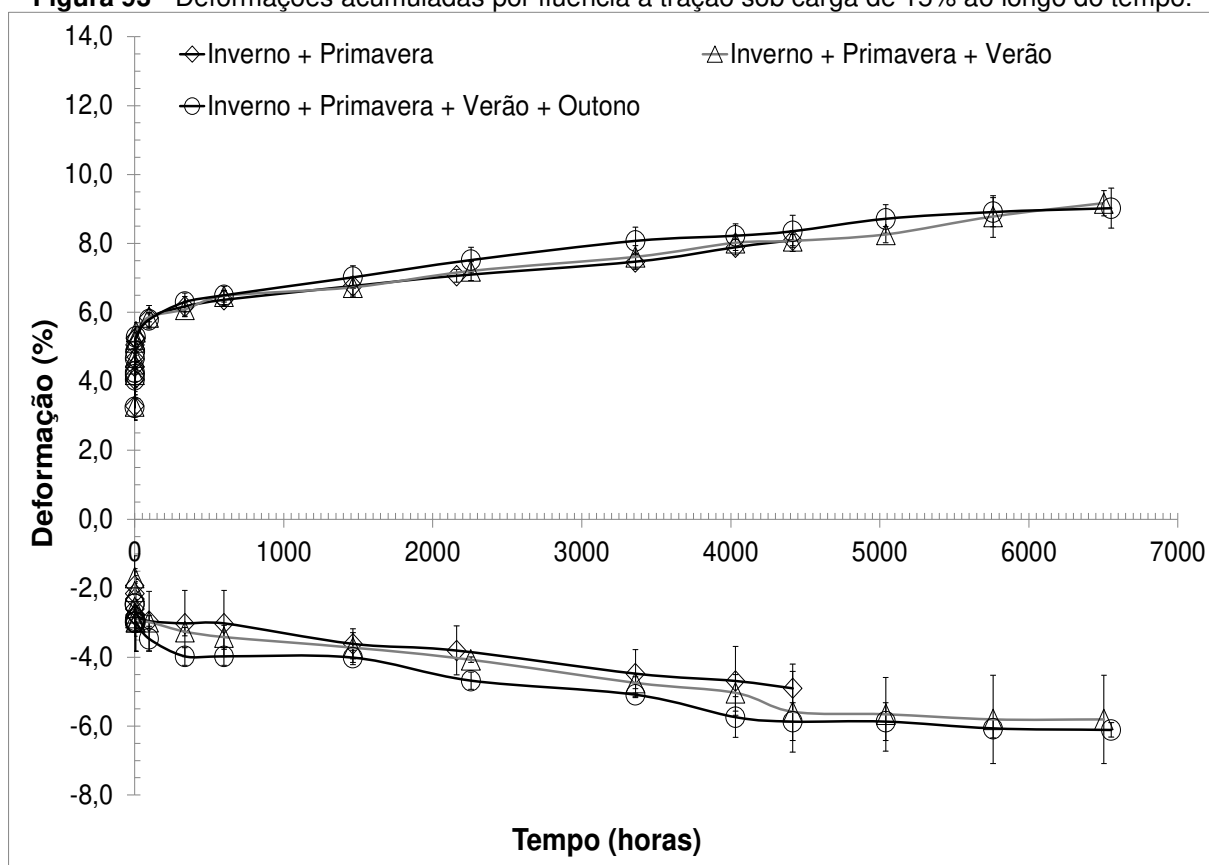
Figura 92 - Deformações acumuladas por fluência à tração sob carga de 15% ao longo do tempo.

(a) Deformação por tempo (horas)

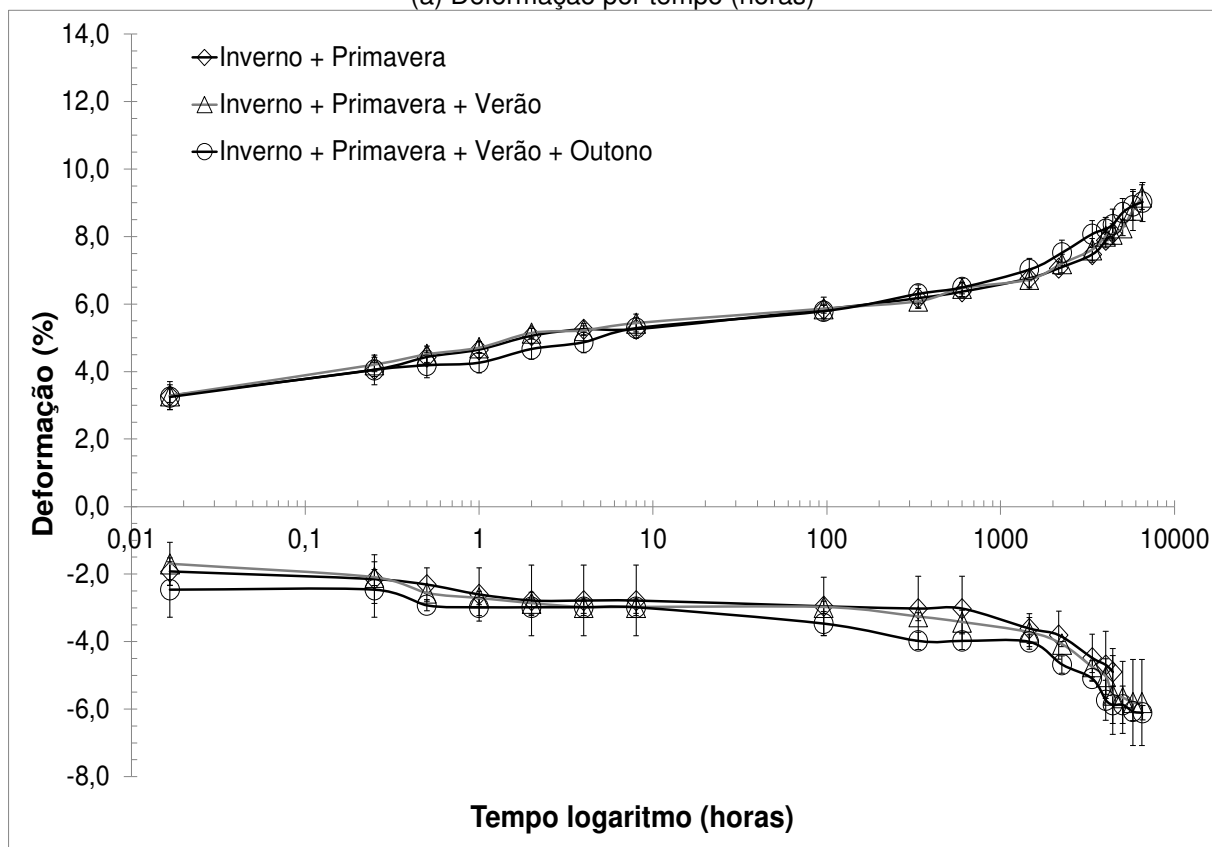


(b) Deformação por tempo, escala logarítmico (horas)

Fonte: a autora.

Figura 93 - Deformações acumuladas por fluência à tração sob carga de 15% ao longo do tempo.

(a) Deformação por tempo (horas)



(b) Deformação por tempo, escala logarítmo (horas)

Fonte: a autora.

Observam-se aumentos graduais de deformações longitudinais finais entre os períodos de inverno, primavera e verão separadamente, provavelmente devido aos aumentos de temperaturas médias diárias observadas entre as referidas estações climáticas (item 4.2). Em contrapartida, menor deformação longitudinal final foi observada no outono, cuja temperatura média diária foi igual a 17,9°C (Tabela 15). A partir da Figura 92a, é possível verificar maiores deformações longitudinal e transversal durante o verão e menores para o inverno, assim como deformações obtidas na primavera e no outono próximas às curvas supracitadas, respectivamente.

Deformações longitudinais no período acumulado de inverno + primavera, com média entre as réplicas igual a 8,2% (Tabela 18), apresentaram resultados entre o período de inverno (média entre réplicas de 7,6%) e primavera (média entre réplicas iguais a 8,6%), separadamente. O mesmo comportamento foi observado no período de exposição acumulado inverno + primavera + verão, cuja média entre as réplicas de 9,0% é inferior a deformação final apenas para o verão (média entre réplicas de 9,7%). Os aumentos nos módulos de rigidez, abordados no tópico seguinte (ver item 5.4.2), para maiores períodos de exposição acumulados explicam o comportamento supramencionado. Também, as curvas observadas para os tempos acumulados de exposição apresentaram aspectos de deformações próximas entre elas (Figura 93), possivelmente devido ao início das exposições terem sido iguais (inverno).

Referente ao período total acumulado inverno + primavera + verão + outono, devido as medidas de deformações terem sido limitadas até 275 dias, com deformação média final entre as réplicas igual a 8,9%, este resultado é similar aos 273 dias de inverno + primavera + verão. Contudo, em razão do aspecto de rigidez (ou ressecamento) observado visualmente nos filamentos do geotêxtil exposto durante o tempo final 365 dias (Figura 91) e módulo de tração calculado (ver item 5.4.2), infere-se que, possivelmente, não ocorreriam aumentos significativos de deformações.

Em termos de deformações transversais, verificam-se aumentos entre os períodos de exposição. Os valores negativos referem-se à contração lateral (Tabela 18). Como o geotêxtil tecido é um material anisotrópico, deformações por fluência à tração entre os sentidos longitudinal e transversal são distintos. Tais resultados são inferiores às deformações longitudinais devido ao entrelaçamento entre as fibras, que pode restringir deformações transversais por contração.

Parâmetros das funções logarítmicas obtidas nas curvas de fluência à tração (Figura 92b e Figura 93b) estão indicados na Tabela 19. Verificam-se aumentos

graduais de deformações iniciais (ε_0) e de taxas de fluência (b) entre os períodos de exposição inverno, primavera e verão. Para o outono, embora tenha apresentado deformação inicial (ε_0 : 5,5155) menor apenas em relação ao verão (ε_0 : 5,5641), obteve-se a menor taxa de fluência (b : 0,2725) dentre os períodos analisados, possivelmente devido à atuação da dinâmica climática.

Tabela 19 - Funções logarítmicas obtidas dos ensaios de fluência em campo.

$\varepsilon_{fluência} = \varepsilon_0 + b \cdot \log(t)$				
Períodos ¹	Sentido de deformação	Deformação inicial, % (ε_0)	Taxa de fluência, % (b)	Coefficiente de determinação (R^2)
I	Longitudinal	4,7432	0,3478	0,973
	Transversal	-2,0229	-0,192	0,913
P	Longitudinal	4,9994	0,4026	0,970
	Transversal	-2,2433	-0,268	0,896
V	Longitudinal	5,5641	0,4049	0,973
	Transversal	-2,4400	-0,257	0,937
O	Longitudinal	5,5155	0,2725	0,994
	Transversal	-2,2125	-0,218	0,968
I + P	Longitudinal	4,6084	0,3399	0,956
	Transversal	-2,468	-0,198	0,798
I + P + V	Longitudinal	4,7081	0,3789	0,907
	Transversal	-2,5041	-0,284	0,801
I + P + V + O ²	Longitudinal	4,4288	0,4378	0,939
	Transversal	-2,8623	-0,287	0,824

OBSERVAÇÕES: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²Última medida de deformação realizada em 22/03/2021 (total de 275 dias).

Fonte: a autora.

Menores ε_0 e b foram observados ao se comparar o período acumulado de inverno + primavera (ε_0 : 4,6084; b : 0,3399) em relação à primavera (ε_0 : 4,9994; b : 0,4026). A mesma inferência é feita entre os períodos inverno + primavera + verão (ε_0 : 4,7081; b : 0,3789) em relação ao verão isoladamente (ε_0 : 5,5641; b : 0,4049). Isto posto, os parâmetros ε_0 e b são condizentes aos comportamentos macro percorridos em comparação aos intervalos de exposição, que apresentaram comportamentos distintos de dinâmica climática.

À vista disto, compreende-se a influência direta da dinâmica climática nas deformações por fluência à tração (Figura 92). Como denotado no referencial teórico (item 2.4.4), a temperatura é um dos principais fatores que atuam em deformações por fluência à tração, bem como as incidências de radiação UV. Portanto, foram verificadas maiores deformações finais (%) e taxas de deformação (%/h) nos períodos de exposição cujos parâmetros meteorológicos incidiram com maiores gradientes, no contexto de cada dinâmica climática em particular.

5.4.2 Parâmetros mecânicos retidos por tempo de exposição

A Tabela 20 sumariza os parâmetros mecânicos obtidos durante os ensaios de durabilidade por fluência à tração e intemperismo simultaneamente. Na Tabela 21, tem-se os pareceres referente a aderência dos resultados amostrais à distribuição normal, assim como por análise gráfica Q-Q normal (Figura 94).

Tabela 20 - Parâmetros mecânicos retidos após períodos de exposição por sinergismo.

Períodos ¹	Rp ³	Resistência à tração máxima - kN/m (T _{máx}) ⁴	Deformação à carga máxima - % (ε _{máx}) ⁴	Perda de resistência à tração	Módulo em tração - kN/m (J _{máx}) ⁵	Tenacidade - kN/m ² (U _{máx}) ⁶
Intacto ²	***	56,7 (0,8%)	14,8 (3,3%)	***	383,1	5154,5
I	R1	38,3 (2,2%)	5,7 (3,0%)	32,4%	671,9	1341,0
	R2	37,6 (2,6%)	5,4 (3,7%)	33,6%	696,3	1247,2
P	R1	35,6 (3,0%)	5,0 (2,5%)	37,2%	712,0	1093,4
	R2	35,5 (1,9%)	4,8 (3,2%)	37,4%	739,6	1046,7
V	R1	36,4 (5,0%)	5,2 (5,6%)	35,8%	700,0	1162,7
	R2	36,0 (2,0%)	5,0 (4,1%)	36,4%	720,0	1105,7
O	R1	41,3 (1,3%)	6,5 (4,6%)	27,1%	635,4	1649,0
	R2	41,2 (3,9%)	6,4 (5,7%)	27,3%	643,8	1619,7
I + P	R1	31,0 (3,3%)	3,8 (4,4%)	45,3%	815,8	723,6
	R2	31,9 (4,6%)	4,1 (3,7%)	43,6%	778,0	803,4
I + P + V	R1	26,4 (4,4%)	3,5 (7,7%)	53,3%	754,3	567,6
	R2	27,4 (2,6%)	3,3 (6,1%)	51,6%	830,3	555,4
I + P + V + O	R1	24,6 (3,8%)	3,4 (12,9%)	56,5%	723,5	513,8
	R2	24,7 (4,8%)	2,9 (8,6%)	56,4%	851,7	440,0

OBSERVAÇÕES: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²Parâmetros intactos (sentido longitudinal) apresentado a título de inferências; ³Réplicas; ⁴Entre parêntesis os respectivos coeficientes de variação (COV); ⁵Parâmetro obtido em T_{máx}. Equivalente ao Módulo de Young para a medida de rigidez de um material sólido (Shukla; Yin, 2006); ⁶Parâmetro obtido em T_{máx}. Adotou-se $U = \frac{1}{2} \times (T_{máx} \times \epsilon_{máx} \times 1/\text{espessura})$ como aproximação da área sobre a curva T_{máx} x ε_{máx} (Koerner, 2005).

Fonte: a autora.

Ambas as análises atestaram a aderência à distribuição normal (H_0), com observação apenas aos resultados de inverno (R2) que apresentaram H_0 não aceita ao teste de aderência por Shapiro-Wilk, mas apenas pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Assim, os resultados amostrais, em cada condição de teste de durabilidade, foram ponderados por análises estatísticas paramétricas.

A Figura 95 apresenta as curvas médias de resistência à tração (kN/m) por deformação (%) obtidas para os períodos de exposição. Menores perdas de resistência à tração foram observadas para as amostras expostas no outono, com o valor médio entre as réplicas igual a 27,2%. Este comportamento pode ser explicado pela menor incidência de radiação UV estimada e temperatura média diária obtidos neste período de exposição (Tabela 15). Na sequência, tem-se o inverno, seguidos por verão e primavera, para este último observado uma maior perda de resistência à tração média (37,3%) em comparação aos períodos de exposição isoladamente.

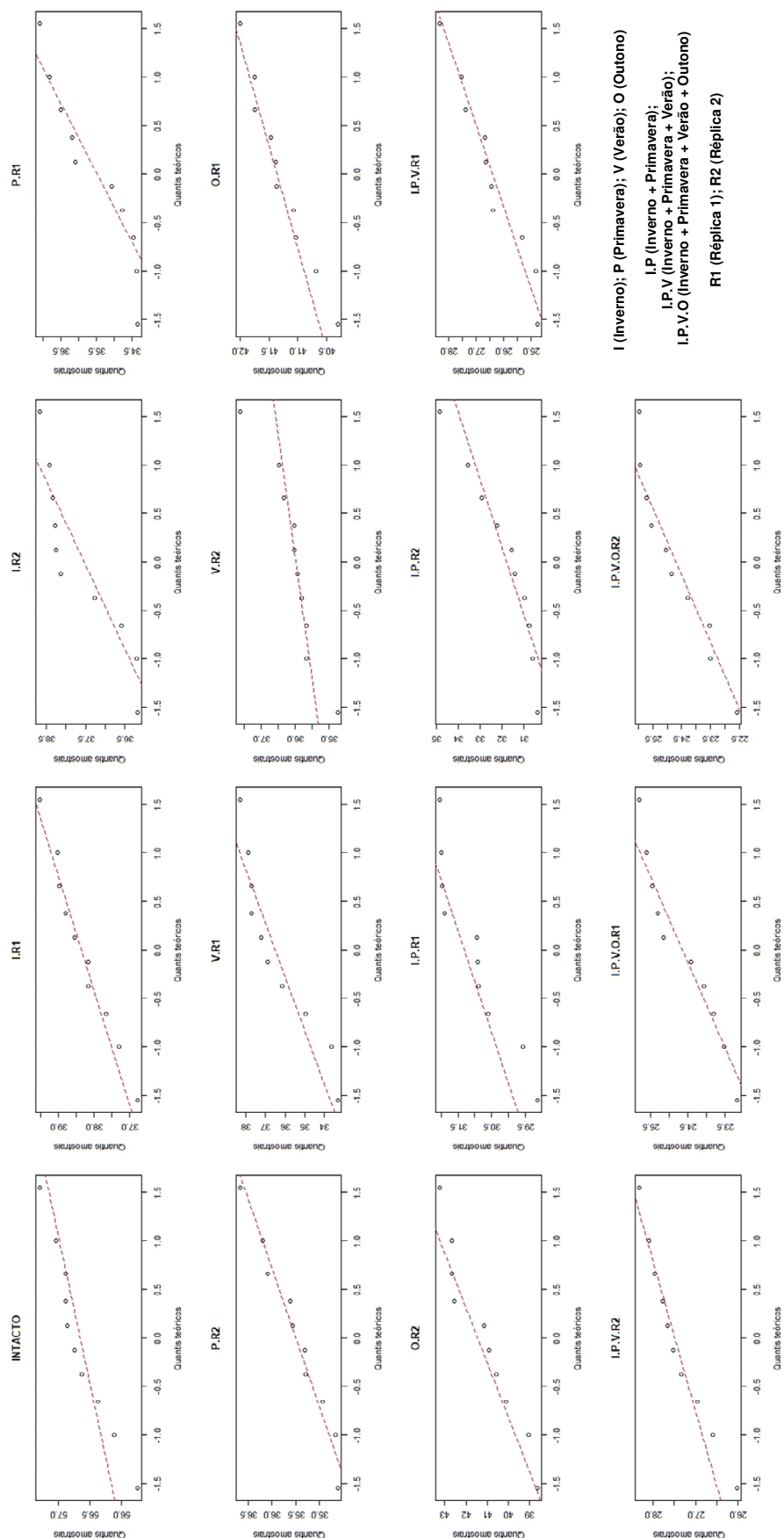
Tabela 21 - Teste de aderência à distribuição normal, com nível de confiança de 95%, para os resultados amostrais de fluência à tração e intemperismo simultâneos.

Shapiro-Wilk (W)				
Períodos¹	Réplicas	Estatística de teste calculado	p-valor	Parecer²
I	R1	0,968	0,87	H ₀ não rejeitada
	R2	0,820	0,02	H ₀ rejeitada
P	R1	0,879	0,12	H ₀ não rejeitada
	R2	0,955	0,738	H ₀ não rejeitada
V	R1	0,867	0,09	H ₀ não rejeitada
	R2	0,906	0,25	H ₀ não rejeitada
O	R1	0,962	0,81	H ₀ não rejeitada
	R2	0,925	0,40	H ₀ não rejeitada
I + P	R1	0,872	0,10	H ₀ não rejeitada
	R2	0,905	0,24	H ₀ não rejeitada
I + P + V	R1	0,944	0,60	H ₀ não rejeitada
	R2	0,945	0,61	H ₀ não rejeitada
I + P + V + O	R1	0,916	0,32	H ₀ não rejeitada
	R2	0,910	0,28	H ₀ não rejeitada
OBSERVAÇÕES: ¹ I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ² A partir da estatística de teste tabelado ($W_{\text{tabelado}} = 0,842$), H ₀ não é rejeitada se: $W_{\text{calculado}} > W_{\text{tabelado}}$ e p-valor > 0,05.				
Kolmogorov-Smirnov (D)				
Períodos¹	Réplicas	Estatística de teste calculado	p-valor	Parecer²
I	R1	0,136	0,99	H ₀ não rejeitada
	R2	0,296	0,28	H ₀ não rejeitada
P	R1	0,190	0,79	H ₀ não rejeitada
	R2	0,126	0,99	H ₀ não rejeitada
V	R1	0,208	0,70	H ₀ não rejeitada
	R2	0,212	0,75	H ₀ não rejeitada
O	R1	0,162	0,95	H ₀ não rejeitada
	R2	0,208	0,77	H ₀ não rejeitada
I + P	R1	0,213	0,67	H ₀ não rejeitada
	R2	0,194	0,77	H ₀ não rejeitada
I + P + V	R1	0,180	0,84	H ₀ não rejeitada
	R2	0,154	0,94	H ₀ não rejeitada
I + P + V + O	R1	0,208	0,70	H ₀ não rejeitada
	R2	0,166	0,90	H ₀ não rejeitada
OBSERVAÇÕES: ¹ I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ² A partir da estatística de teste tabelado ($W_{\text{tabelado}} = 0,842$), H ₀ não é rejeitada se: $W_{\text{calculado}} > W_{\text{tabelado}}$ e p-valor > 0,05.				

Fonte: a autora.

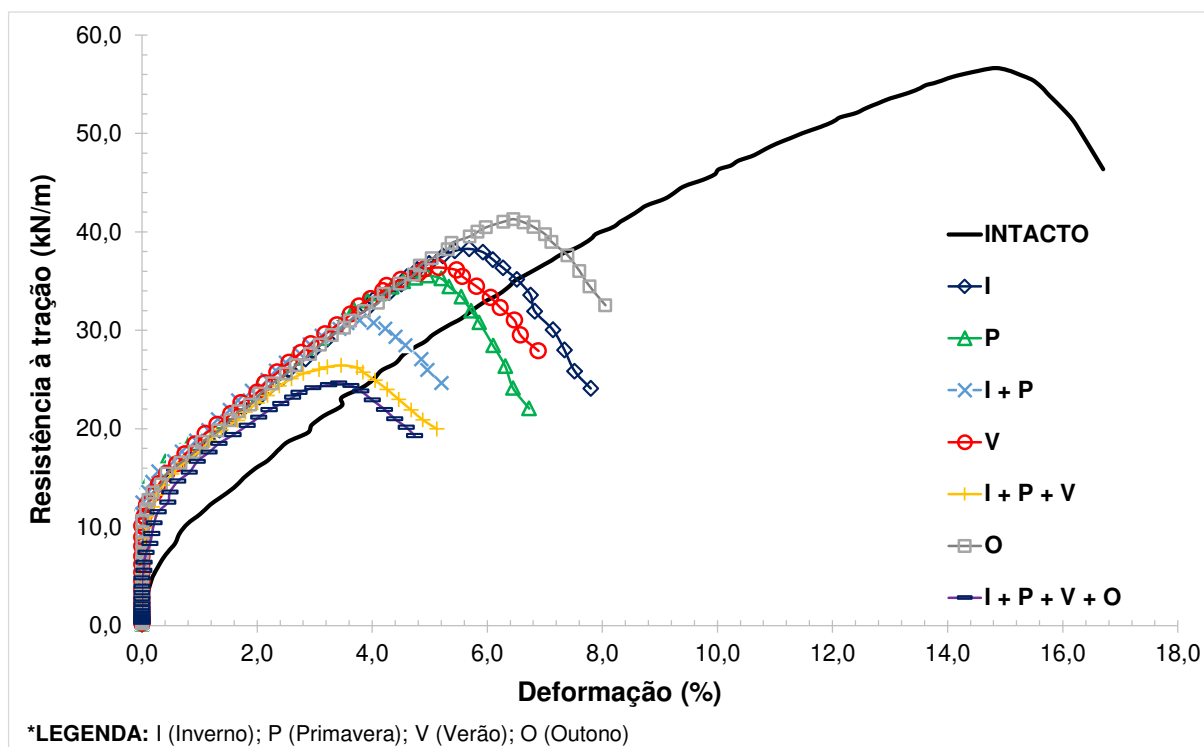
Os períodos acumulados de exposição indicaram menores resultados de resistência à tração máxima retidos conjuntamente a reduções de deformação à carga máxima, com perda de resistência à tração média entre as réplicas correspondentes a 44,5% (Inverno + Primavera), 52,5% (Inverno + Primavera + Verão) e de 56,5% (período total de 365 dias). A partir do conceito de meia-vida, que indica a redução de 50% de propriedades mecânicas de interesse em relação aos parâmetros do geotêxtil intacto, verifica-se que o geotêxtil tecido de polipropileno atingiu a sua meia-vida, nas condições analisadas, a partir da exposição em períodos acumulados de inverno a verão (273 dias).

Figura 94 - Teste de aderência por gráfico Q-Q normal para os resultados amostrais de fluência à tração e intemperismo simultâneos.



Fonte: a autora.

Figura 95 - Curvas médias de resistência à tração por deformação para os períodos de exposição por ação simultânea de fluência à tração e intemperismo¹³.



Fonte: a autora.

As reduções de resistência à tração e de deformação à carga máxima são diretamente relacionadas e inferiores a estes parâmetros referente ao geotêxtil intacto (Tabela 20), bem como deslocamentos das curvas médias à esquerda para maiores tempos de exposição (Figura 95), em comparação à curva média do geotêxtil intacto, assim como as curvas médias obtidas para as exposição ao intemperismo isoladamente (Figura 86).

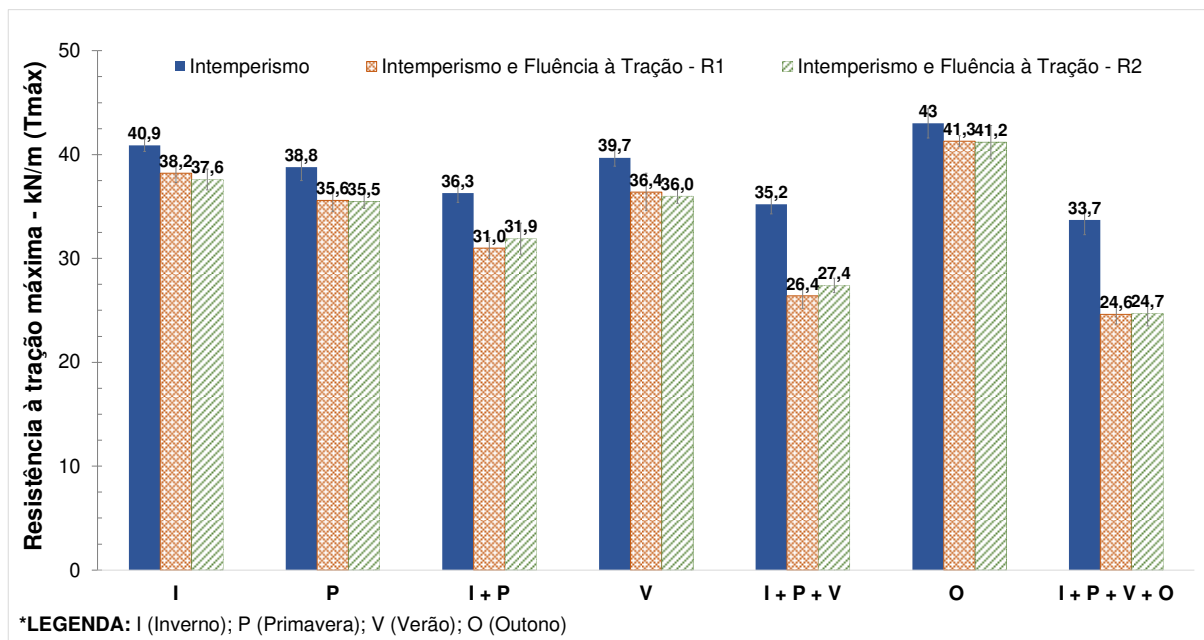
Verificam-se aumentos nos módulos em tração (rigidez) nas amostras analisadas em maiores períodos de exposição acumulados e na estação climática de primavera isoladamente. Os aumentos dos módulos de rigidez, que também foram averiguados por análises tátil-visuais, corroboram nos deslocamentos das curvas médias à esquerda e com deformações (%) por tracionamento (kN/m) menos dúcteis (ou semi-frágeis). De modo contrário, foram observadas reduções nas tenacidades (kN/m²) com os aumentos de perdas de resistências e módulos em tração (Tabela 20).

Portanto, os resultados obtidos e percorridos acima corroboram na influência do intemperismo no comportamento de sinergismo entre os fatores de degradação,

¹³ Foram apresentadas curvas médias de resistência à tração por deformação apenas para as réplicas 1 (R1) dos períodos de exposição simultâneos de fluência à tração e intemperismo, com o intuito de facilitar a visualização das curvas médias obtidas nos ensaios de campo.

conforme análise comparativa apresentada na Figura 96, principalmente para os maiores períodos de exposição. Ademais, as solicitações por fluência à tração corroboraram em maiores perdas de resistência para os períodos acumulados de inverno à verão e tempo total de exposição de 365 dias, com o alcance da meia-vida do geotêxtil nas condições de estudo.

Figura 96 - Comparativo de resistências à tração retidos para as exposições ao intemperismo isoladamente e com a ação conjunta de fluência.



Fonte: a autora.

Referente a inferência quanto as hipóteses de semelhanças (H_1) ou não (H_0) quanto aos comportamentos de durabilidade dentre as médias amostrais, para as réplicas (R1) e a réplica 2 (R2), de comportamentos de durabilidade entre as estações climáticas e fluência à tração conjuntamente, a Tabela 22 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA).

Tabela 22 - ANOVA para os períodos de exposição isoladamente.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Média Quadrática	F_0	$f_{\alpha, a-1, a(n-1)}$ ($f_{0,05;3;4}$)
Tratamento	38,79	3	12,93		
Erro	0,29	4	0,07	179,20	6,59
Total	39,08	7			

Fonte: a autora.

Infere-se pela rejeição da H_0 , uma vez que o valor da estatística de teste (F_0) é superior ao valor tabelado de $f_{0,05;3;4}$. Ou seja, ao menos um dos tratamentos (estações climáticas) se difere das demais. Deste modo, comparou-se os pares de médias entre os tratamentos (estações climáticas) pelo método de Fischer da mínima

diferença significativa (MDS), pelo emprego da Equação 38. Os resultados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Análise da mínima diferença significativa (MDS) entre os períodos de exposição.

Parâmetros	Valores	Média dos tratamentos	Comparações entre as médias	Parecer
$t_{0,025;4}$	2,447	$\bar{y}_1$ [inverno = 1] = 37,95	4 versus 1 = 3,27	> MDS
MQ_E	0,1	$\bar{y}_2$ [primavera = 2] = 35,53	4 versus 2 = 5,69	> MDS
n	2	$\bar{y}_3$ [verão = 3] = 36,20	4 versus 3 = 5,02	> MDS
		$\bar{y}_4$ [outono = 4] = 41,22	1 versus 2 = 2,42	> MDS
MDS	0,66	***	1 versus 3 = 1,75	> MDS
		***	3 versus 2 = 0,67	< MDS

Fonte: a autora.

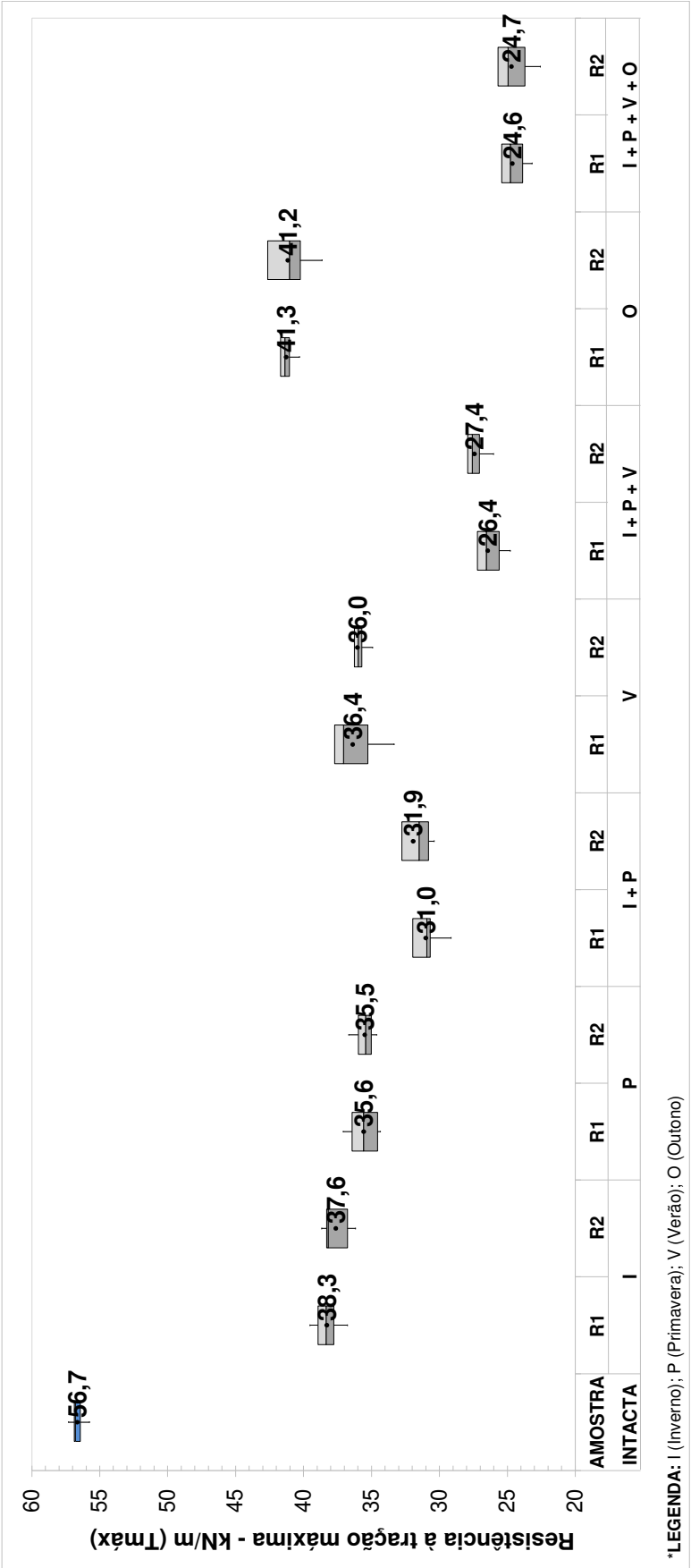
Verifica-se que existem diferenças entre todos os pares de médias. Contudo, para as estações primavera e verão, embora o resultado de mínima diferença significativa (MDS) seja de 0,66 e a comparação entre médias igual de 0,67, infere-se que, estatisticamente e para nível de confiança de 95%, as médias amostrais apresentaram resultados semelhantes. Ressalta-se que, conforme discorrido anteriormente (item 5.3.2), a diferença percentual entre as perdas de resistências média para os períodos de primavera e verão foi de 1,2%, inferior aos COV observados nas réplicas entre ambos os períodos.

A análise discorrida apresenta significativa importância quanto ao planejamento de início de instalação de geossintéticos em aplicações acima do solo e sob fluência à tração, conjuntamente aos demais critérios de dimensionamento das propriedades funcionais. Além disso, os resultados evidenciam a influência das dinâmicas climáticas isoladas na durabilidade dos geossintéticos.

A Figura 97 apresenta a distribuição dos resultados amostrais por diagrama de caixas para todos os períodos de exposição analisados. Na Figura 98, tem-se o tratamento estatístico por intervalos de confiança (IC), para um nível de confiança de 95%, com a obtenção dos valores médios populacionais em todos os períodos de exposição.

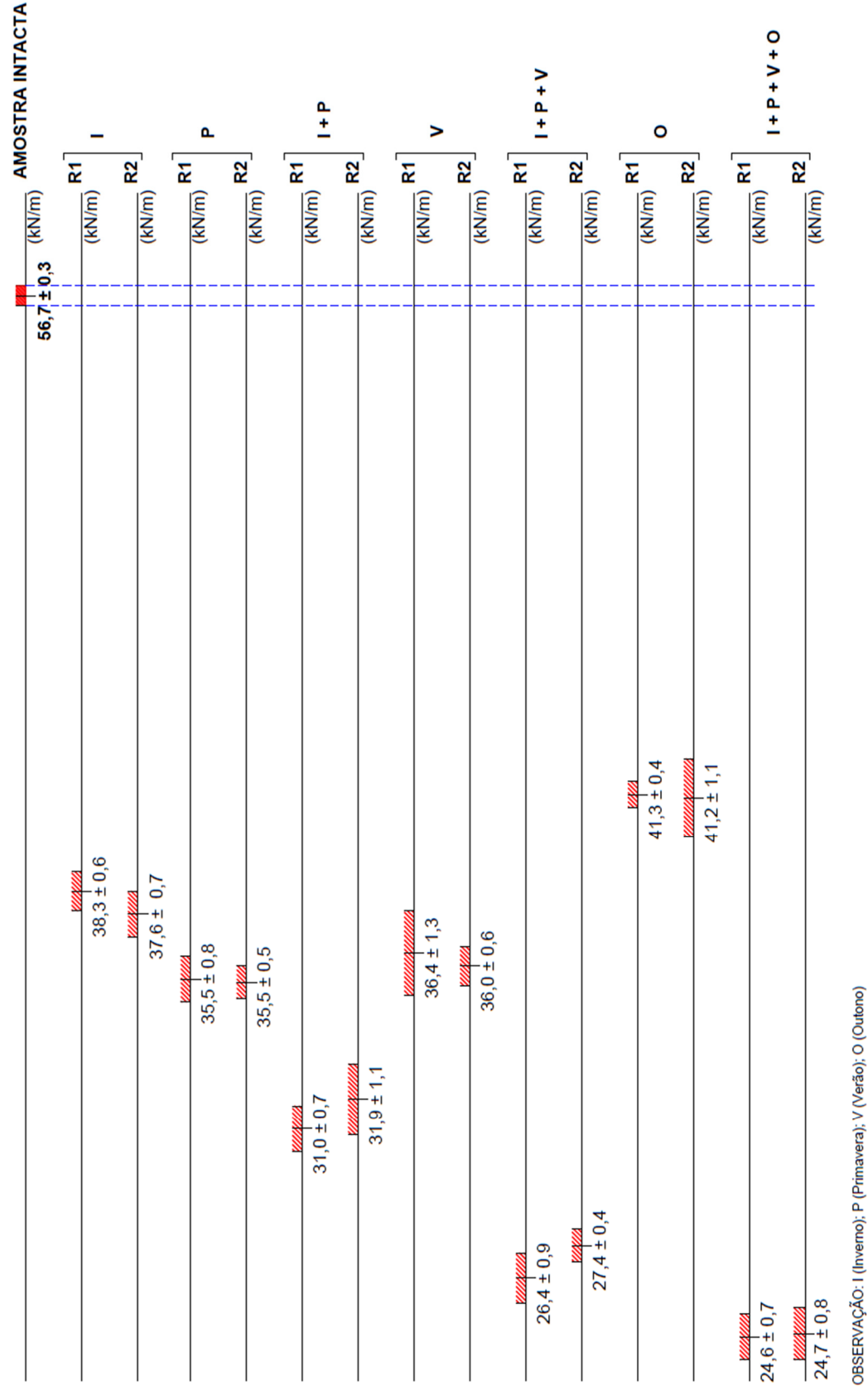
Verifica-se a distribuição dos resultados entre o intervalo interquartil e ausências de maiores faixas entre os limites inferior e superior e de valores atípicos (ou espúrios). Portanto, serão considerados todo o conjunto de dados amostrais para as análises subsequentes. Além disso, os valores médios são próximos às respectivas medianas e todos os intervalos interquartil estão abaixo do intervalo referente aos dados amostrais de caracterização (amostra intacta).

Figura 97 - Diagrama de caixas para os resultados de resistência à tração retidos (kN/m) nos períodos de exposição por sinergismo de fluência à tração e intemperismo.



Fonte: a autora.

Figura 98 - Intervalo de confiança (IC), com nível de confiança de 95%, para os resultados de resistência à tração retidos (kN/m) nos períodos de exposição por sinergismo de fluência à tração e intemperismo.



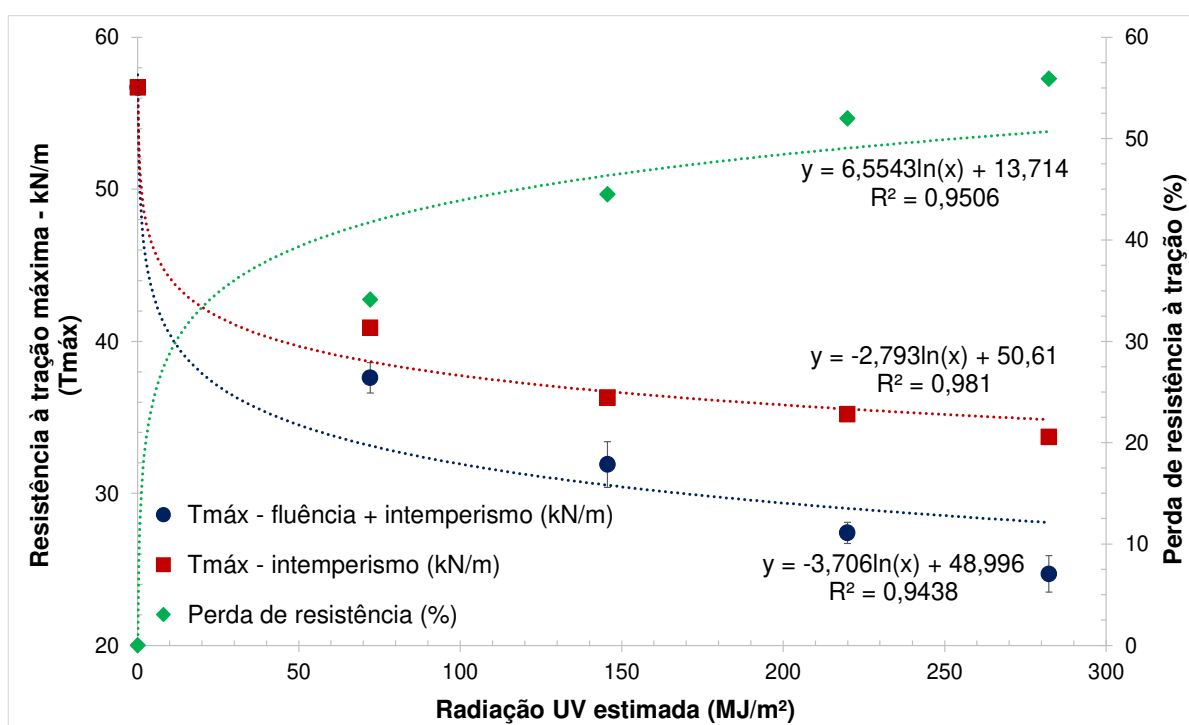
Fonte: a autora.

Os IC para os períodos isolados e acumulados de exposição deslocaram-se à esquerda do IC para a amostra intacta ($54,8 < \mu < 57,5$ kN/m), com os maiores deslocamentos decorrentes dos períodos acumuladores de exposição entre inverno à verão e para o tempo total de ensaio (365 dias), conforme esperado. Ademais, os IC indicaram apenas um ligeiro aumento na dispersão dos resultados em comparação à faixa intervalar para o geotêxtil intacto devido às alterações mecânicas ocorridas pela exposição ao intemperismo.

Importante ressaltar que os parâmetros mecânicos obtidos entre as réplicas 1 e 2 foram condizentes, para todos os períodos analisados. Posto isto, evidencia-se a importância de estudos de durabilidade por sinergismo serem planejados em réplicas, o qual permite corroborar a ponderação dos resultados experimentais obtidos.

A Figura 99 apresenta os modelos matemáticos por regressão linear que melhor descrevem a resistência à tração máxima (kN/m) e perdas de resistências à tração (%) em função das incidências de radiação UV estimadas (MJ/m²) para os períodos acumulados e avaliados nas condições de sinergismo analisadas. A título de comparação, indicou-se o comportamento obtido para a exposição ao intemperismo isoladamente. Como abordado na Figura 90, escolheu-se a variável radiação UV estimada sem desconsiderar o seu contexto na dinâmica climática em análise.

Figura 99 - Comportamento de resistência à tração máxima (kN/m) para exposição simultânea de fluência à tração e intemperismo por radiação UV estimada (MJ/m²).



Fonte: a autora.

Conforme observado, obteve-se modelos matemáticos linear-log (coeficiente de determinação R^2 igual a 94%) que melhor se ajustaram aos resultados amostrais obtidos, com as variáveis X e Y correspondentes a radiação UV estimada (MJ/m^2) na dinâmica climática analisada e resistência à tração máxima (kN/m), respectivamente, e os coeficientes (a e b) também dependentes da resistência à tração característica do geotêxtil tecido de polipropileno analisado. Importante destacar a similaridade na redução de resistência à tração retida para a exposição ao intemperismo isolado e por sinergismo entre fluência à tração e intemperismo ao longo do tempo, porém com a acentuação da degradação pela solicitação por fluência à tração.

A análise discurrida apresenta significativa importância quanto ao planejamento de início de instalação de geossintéticos em aplicações acima do solo e sob fluência à tração, conjuntamente aos demais critérios de dimensionamento das propriedades disponíveis e requeridas. Os resultados evidenciam a influência da dinâmica climática na durabilidade para as condições de contorno avaliadas.

Ademais, aplicações de geotêxteis sob sinergismo por fluência à tração e intemperismo requerem a atenção para o adequado dimensionamento do período máximo de exposição em campo, de modo que o material consiga desempenhar suas funções dentro da vida prevista de projeto, ou seja, com a manutenção da propriedade funcional superior à requerida.

5.5 DURABILIDADE POR FLUÊNCIA À TRAÇÃO EM LABORATÓRIO

5.5.1 Deformações por fluência ao longo do tempo

A Tabela 24 apresenta os valores de deformação final média obtidos nas amostras de geotêxtil tecido de polipropileno submetidos à fluência em laboratório dos tipos convencional e inclinado durante 93 dias, período referente à exposição durante o inverno. A título de comparação, reportam-se nas discussões os resultados obtidos no período de inverno.

Ressalva-se que os resultados de fluência inclinada (R_2) não foram apresentados, uma vez que foi verificado inconsistência devido ao erro cometido durante a montagem deste ensaio em laboratório.

Na Figura 100, tem-se as curvas de deformações acumuladas por fluência para as condições de fluência em laboratório (Figura 75). Para melhor inferência, foram incluídos intervalos de desvios padrão entre as leituras realizadas com uso de

paquímetro digital ao longo do tempo. Os parâmetros das funções logarítmicas obtidas a partir das curvas de fluência à tração estão apresentadas na Tabela 25¹⁴.

Tabela 24 - Deformação final média por fluência à tração em laboratório.

Tipo	Réplicas	Sentido longitudinal (%)*	Sentido transversal (%)*
Inclinado	R1	5,2 (4,9%)	-1,6 (8,2%)
Convencional	R1	6,4 (6,0%)	-1,9 (6,3%)
	R2	6,6 (5,8%)	-1,8 (7,4%)
Inclinado em campo (inverno)	R1	7,8 (4,3%)	-4,1 (7,8%)
	R2	7,3 (6,6%)	-4,0 (10,5%)

OBSERVAÇÕES: *Entre parêntesis os respectivos coeficientes de variação.

Fonte: a autora.

Ao se comparar as fluências inclinado e convencional, verifica-se uma redução média em torno de 1%, ou seja, a influência do sistema de roletes em alumínio na transmissão das cargas nos ensaios de fluência não convencional pela largura das amostras. Ainda, ponderam-se maiores deformações médias finais para a fluência à tração em campo (inverno) em comparação às fluências realizadas em laboratório, com diferenças nas deformações médias finais em torno de 1,1% (convencional) e 2,1% (inclinado). Consequentemente, a atuação da dinâmica climática no aumento de deformações por fluência à tração em campo.

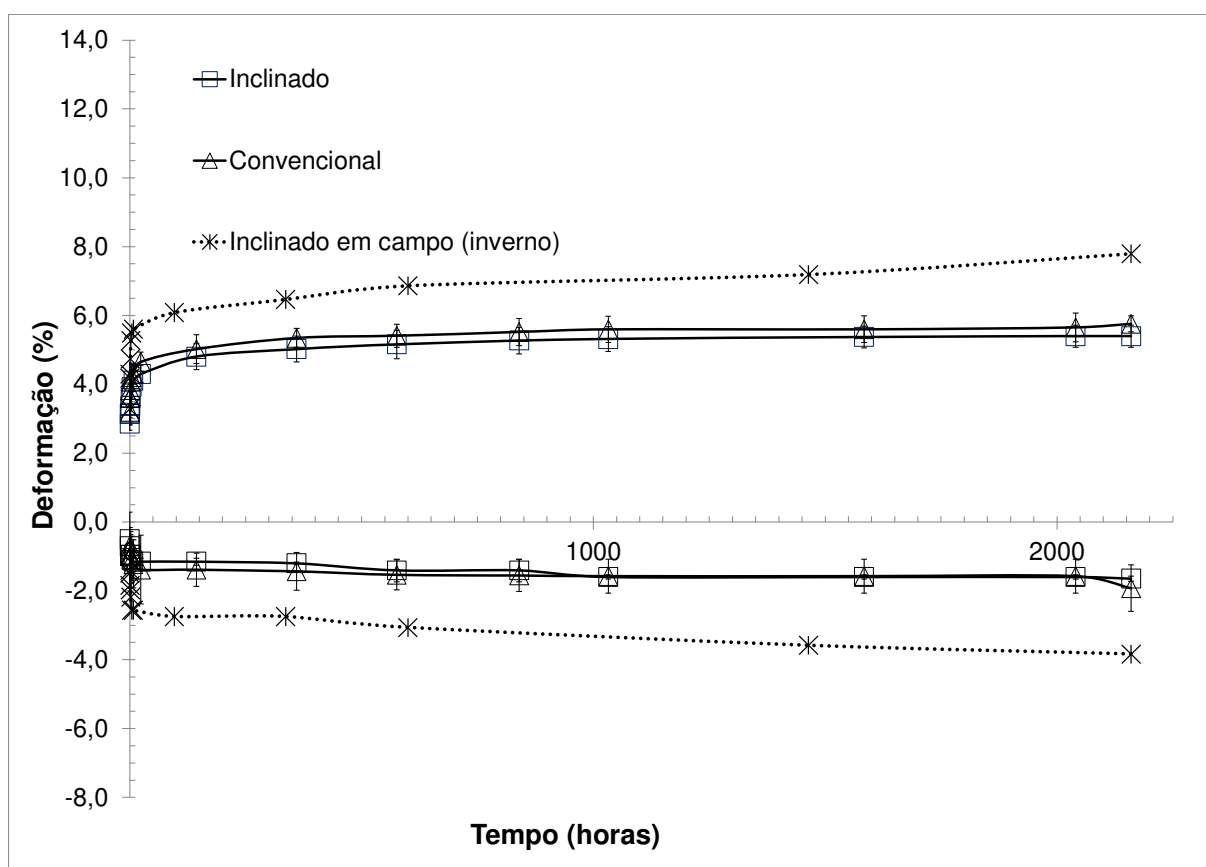
Como indicado na Tabela 25, maiores deformações iniciais e taxas de fluência foram observadas nas amostras em campo (inverno) devido a dinâmica climática, o qual influencia diretamente no comportamento de fluência à tração ao longo do tempo, assim como nas deformações finais médias (Tabela 24).

Tabela 25 - Funções logarítmicas obtidas dos ensaios de fluência em laboratório

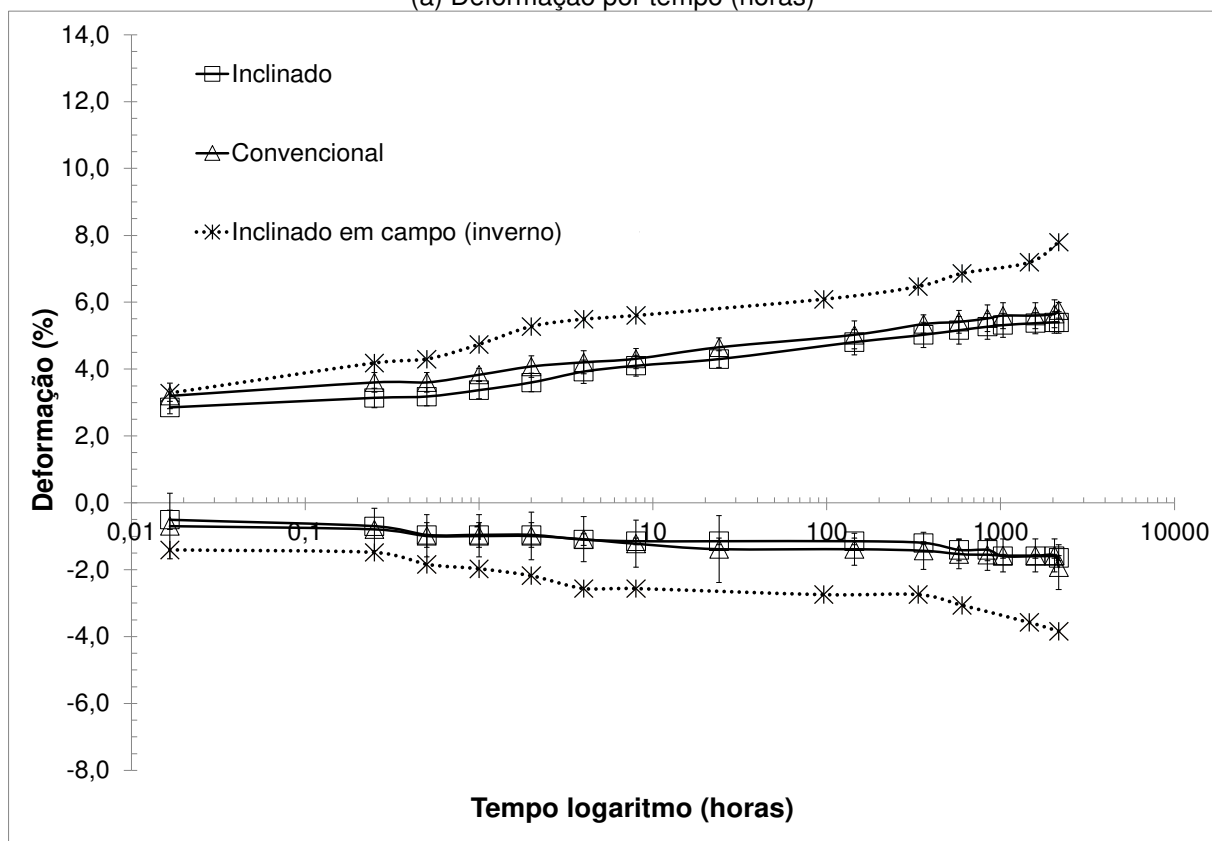
$\varepsilon_{fluência} = \varepsilon_0 + b \cdot \log(t)$				
Períodos	Sentido de deformação	Deformação inicial (ε_0)	Taxa de fluência (b)	Coeficiente de determinação (R^2)
Inclinado	Longitudinal	3,5437	0,2311	0,984
	Transversal	-0,9026	-0,085	0,916
Convencional	Longitudinal	3,9209	0,2464	0,990
	Transversal	-0,9963	-0,087	0,931
Inverno (inclinado em campo)	Longitudinal	4,7432	0,3478	0,973
	Transversal	-2,0229	-0,192	0,913

Fonte: a autora.

¹⁴Foram apresentadas curvas de deformações por fluência à tração por tempo de apenas uma das réplicas para a fluência à tração convencional e fluência à tração em campo (inverno) com o intuito de facilitar a sua visualização.

Figura 100 - Deformações acumuladas por fluência à tração sob carga de 15% ao longo do tempo.

(a) Deformação por tempo (horas)



(b) Deformação por tempo, escala logaritmo (horas)

Fonte: a autora.

Por último, verificam-se similaridades nas curvas de fluência ao longo do tempo, de modo que as taxas de fluência (b) e a deformação inicial (ϵ_0) em laboratório mantiveram-se próximas, com um ligeiro aumento na fluência convencional em comparação à fluência inclinada em laboratório.

5.5.2 Resistência à tração retida para fluência em laboratório

A Tabela 26 sumariza os parâmetros mecânicos obtidos durante os ensaios de durabilidade por fluência à tração em laboratório durante 93 dias. A Figura 101 apresenta as curvas médias de resistência à tração (kN/m) por deformação (%) nas condições analisadas.

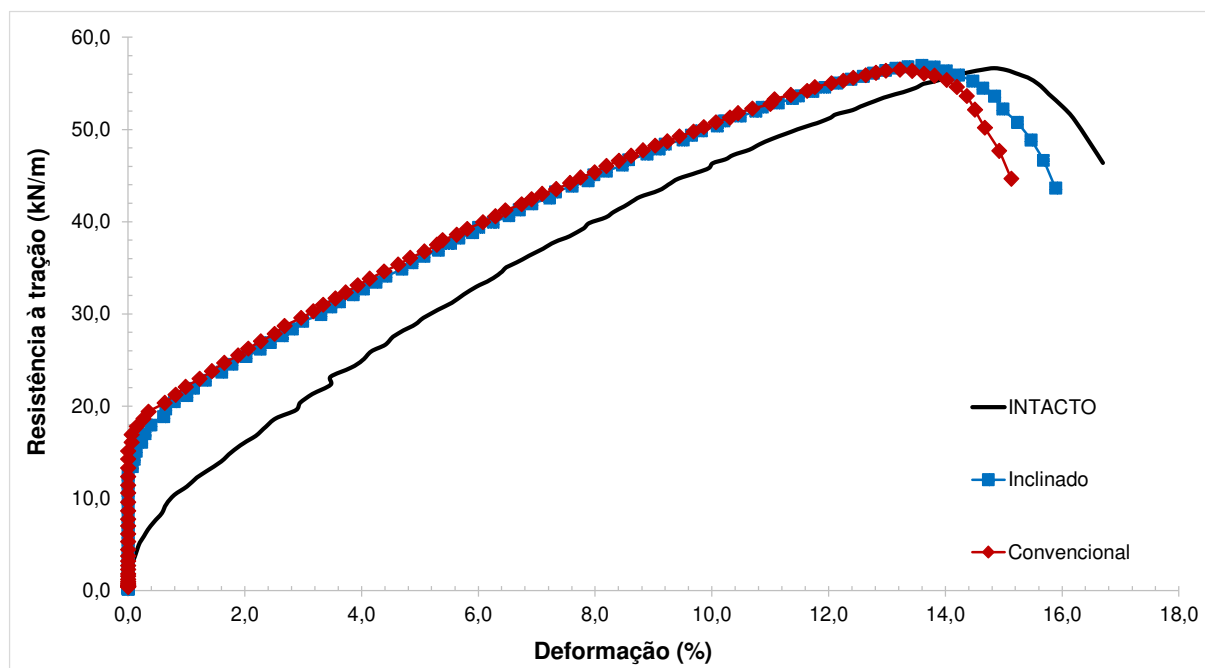
Tabela 26 - Parâmetros mecânicos retidos após ensaio em laboratório

Ensaio	Réplica	Resistência à tração máxima - kN/m ($T_{m\acute{a}x}$) ¹	Deformação à carga máxima - % ($\epsilon_{m\acute{a}x}$) ¹	Perda de resistência à tração	Módulo em tração - kN/m ($J_{m\acute{a}x}$) ²
Intacto	***	56,7 (0,8%)	14,8 (3,3%)	***	383,1
Convencional	R1	56,5 (1,9%)	13,2 (1,9%)	0%	428,0
	R2	57,0 (2,4%)	13,5 (2,9%)	0%	422,2
Inclinado	***	56,9 (1,9%)	13,6 (3,4%)	0%	418,4

OBSERVAÇÃO: ¹Entre parêntesis os respectivos coeficientes de variação (COV). ²Parâmetro obtido em $T_{m\acute{a}x}$.

Fonte: a autora.

Figura 101 - Curvas médias de resistência à tração por deformação para os ensaios de fluência à tração em laboratório.



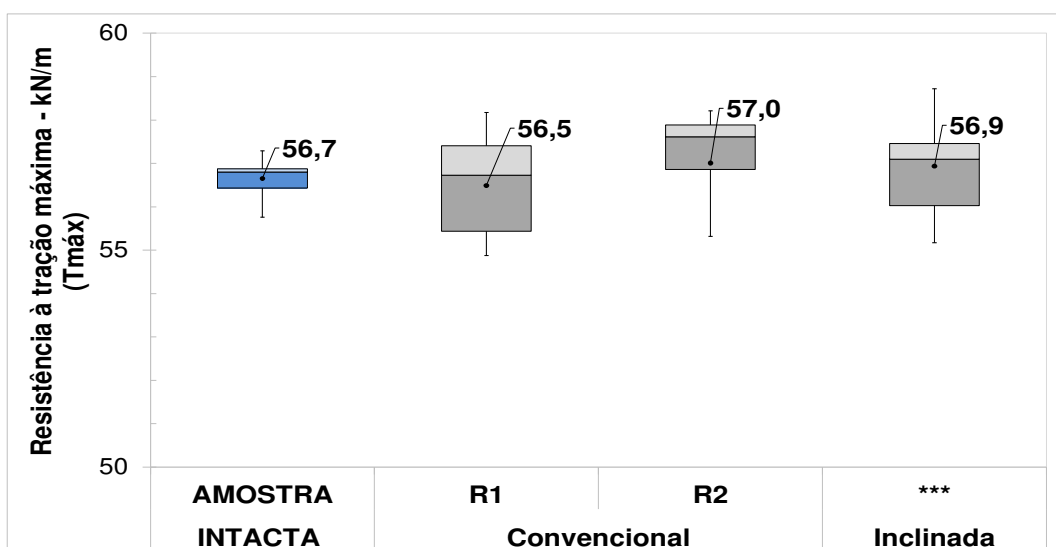
Fonte: a autora.

Para ambas as condições de ensaio, não foram observadas perdas de resistência à tração em comparação a resistência à tração máxima média ($T_{m\acute{a}x}$) igual a 56,7 kN/m referente ao geotêxtil intacto. Contudo, o pouco aumento do módulo em tração nas

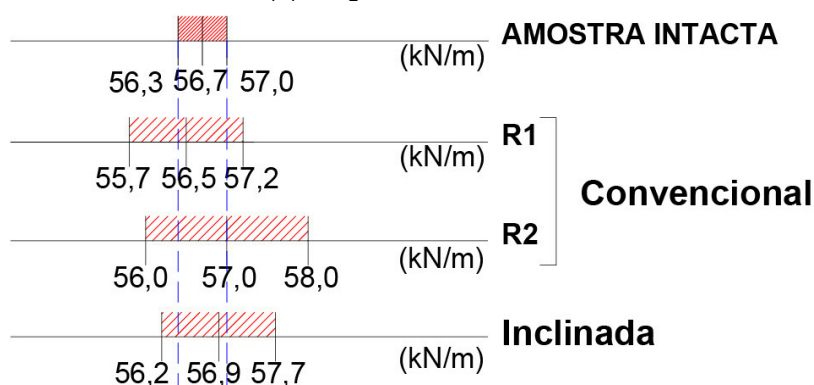
amostras sob fluência indicou a ação deste fator em alterações na rigidez do geotêxtil tecido de polipropileno analisado, conforme verificado pelo deslocamento das curvas médias à esquerda e acima da curva média do geotêxtil intacto.

Na Figura 102, tem-se os resultados amostrais por diagrama de caixas, assim como o tratamento estatístico por intervalos de confiança (IC), para um nível de confiança de 95%. Apesar da reduzida dispersão entre os resultados de resistência à tração retidos amostrais (Figura 102a) e por inferência populacional (Figura 102b), bem como na deformação à carga máxima média em ambas os testes em laboratório, afirma-se que o comportamento de fluência à tração inclinada apresenta resultados similares em relação à fluência convencional.

Figura 102 - Resultados de resistência à tração retidos (kN/m) em ensaios de fluência à tração em laboratório.



(a) Diagrama de caixas.



(b) Intervalo de confiança (IC), com nível de confiança de 95%.

Fonte: a autora.

Dessa maneira, ensaios de fluência à tração na condição inclinada de 22° por dispositivo de roletes em tubos de alumínio não comprometeram, estatisticamente, a transferência da solicitação de fluência pela largura das amostras a partir do conjunto

de pesos estáticos. Apesar da diferença média de 1% entre as deformações nas áreas delimitadas no geotêxtil para as fluências convencional e inclinada (Tabela 24), este comportamento não influenciou em termos de resistências à tração retidas, cujos parâmetros foram condizentes entre as réplicas 1 e 2.

Conforme destacado anteriormente (item 5.5.1), devido ao erro verificado na montagem da réplica 2 (R2) referente a fluência à tração inclinada, particularmente na fixação da garra inferior desta amostra, obteve-se resistência à tração retida média de 54,3 kN/m, coeficiente de variação igual a 2,2%, resultado inferior a ambas as réplicas de fluência à tração convencional e a réplica R1 para a situação inclinada (Tabela 26). Dessa maneira, ressalva-se a importância no adequado nivelamento da garra de fixação do conjunto de pesos para ensaios de fluência.

5.6 FATORES DE REDUÇÃO PARA A DURABILIDADE POR SINERGISMO

A Tabela 27 apresenta os valores para fatores de redução parciais (FR_p) obtidos nas condições de contorno em termos de resistência à tração máxima retida média ($T_{m\acute{a}x}$). De forma macro, observa-se aumentos nos FR_p ao se comparar os resultados obtidos entre as solicitações por intemperismo isoladamente e por ação simultânea do intemperismo e fluência à tração, para os mesmos intervalos de dinâmica climática analisados. Como esperado, maiores períodos de exposição também corroboraram em aumentos nos FR_p . Isto é uma consequência direta de maiores perdas de resistência à tração sob sinergismo, tempos de exposição e aos parâmetros meteorológicos acumulados,

Ensaio de fluência à tração e intemperismo simultâneos obtiveram FR_p maiores em relação ao intemperismo isoladamente. Para os períodos de exposição acumulados de 273 e 365 dias, os FR_p apresentam maiores diferenças em relação aos respectivos períodos de exposição para intemperismo isoladamente. Nestas situações, as perdas de resistências à tração foram superiores a 50%, o qual corresponde ao alcance da meia-vida do geotêxtil para as condições analisadas. Com isto, foram obtidos FR_p superiores a 2,0.

De modo complementar, a partir do ensaio de fluência à tração em laboratório (93 dias; inclinada), ao se obter FR_p igual a 1,0 (para carregamento de fluência igual a 15%), infere-se acerca da ocorrência de sinergia dos fatores de degradação nas condições estabelecidas neste estudo.

Tabela 27 - Fatores de redução parciais (FR_p).

Ensaio ¹			Resistência à tração máxima - kN/m (T _{máx}) ²	Perda de resistência à tração	Fator de redução parcial (FR _p) ³
Campo (intemperismo e fluência à tração)	I (93 dias)	Intemperismo	40,9 (1,5%)	27,8%	1,4
		Fluência - R1	38,3 (2,2%)	32,4%	1,5
		Fluência - R2	37,6 (2,6%)	33,6%	1,5
	P (90 dias)	Intemperismo	38,8 (3,4%)	31,4%	1,5
		Fluência - R1	35,6 (3,0%)	37,2%	1,6
		Fluência - R2	35,5 (1,9%)	37,4%	1,6
	V (90 dias)	Intemperismo	39,7 (2,0%)	29,9%	1,4
		Fluência - R1	36,4 (5,0%)	35,8%	1,6
		Fluência - R2	36,0 (2,0%)	36,4%	1,6
	O (92 dias)	Intemperismo	43,0 (3,3%)	24,1%	1,3
		Fluência - R1	41,3 (1,3%)	27,1%	1,4
		Fluência - R2	41,2 (3,9%)	27,3%	1,4
	I + P (183 dias)	Intemperismo	36,3 (2,6%)	35,9%	1,6
		Fluência - R1	31,0 (3,3%)	45,3%	1,8
		Fluência - R2	31,9 (4,6%)	43,6%	1,8
I + P + V (273 dias)	Intemperismo	35,2 (2,7%)	37,8%	1,6	
	Fluência - R1	26,4 (4,4%)	53,3%	2,1	
	Fluência - R2	27,4 (2,6%)	51,6%	2,1	
I + P + V + O (365 dias)	Intemperismo	33,7 (4,0%)	40,5%	1,7	
	Fluência - R1	24,6 (3,8%)	56,5%	2,3	
	Fluência - R2	24,7 (4,8%)	56,4%	2,3	
Laboratório (93 dias; inclinada)		Fluência - R1	56,9 (1,9%)	0%	1,0
		Fluência - R2	***	***	***

OBSERVAÇÕES:

¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²Entre parêntesis os respectivos coeficientes de variação (COV); ³ $FR_p = \left(T_{m\acute{a}x_{intacto}} / T_{m\acute{a}x_{retida}} \right)$.

Fonte: a autora.

Ensaio de fluência à tração e intemperismo simultâneos durante a primavera e o verão obtiveram FR_p igual a 1,6 e menor valor para o período de outono (1,4). O FR_p para o tempo total de exposição (365 dias) sob fluência à tração e intemperismo foi igual a 2,3, cujo resultado superior a 2,0 indica-se o alcance da meia-vida nas condições analisadas.

A aplicação de FR_p isolados requer uma análise cautelosa de projeto, uma vez que maiores fatores de redução influenciam diretamente no dimensionamento das propriedades disponíveis dos geossintéticos para uma determinada vida de projeto.

Ressalta-se que, independente das condições de solicitação de campo para determinada vida de serviço de projeto, ponderações racionais de fatores de redução são necessárias, o que requer a aplicação de FR_p adequados às condições de projeto.

Por último, os FR_p obtidos são, apenas, para fins de pesquisa, uma vez que foram analisados apenas um geotêxtil e em condições de contorno específicas de campo.

5.7 ANÁLISE PROBABILÍSTICA PARA A DURABILIDADE POR SINERGISMO

A Tabela 28 apresenta a análise probabilística de durabilidade aos níveis de censuras estabelecidos. Em detrimento dos resultados amostrais apresentarem aderência à distribuição normal, os resultados foram obtidos a partir da referida distribuição amostral, bem como os parâmetros para as inferências probabilísticas em função de médias entre as réplicas (R1 e R2) analisadas.

Tabela 28 - Probabilidades em função de resistências à tração retidas.

Períodos de exposição	Radiação UV estimada (MJ/m ²)	Perda de resistência à tração (%)	T _{máx} 80%	T _{máx} 60%	T _{máx} 50%
			P [X > 45,4 kN/m]	P [X > 34,0 kN/m]	P [X > 28,4 kN/m]
I	72,1	33,0	0%	99,9%	100%
I + P	145,6	44,5	0%	1,7%	99,6%
I + P + V	219,9	52,5	0%	0%	5,4%
I + P + V + O	282,3	54,0	0%	0%	0%

OBSERVAÇÃO: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono).

Fonte: a autora.

Verifica-se a probabilidade da retenção total de resistência à tração no período de inverno (72,1 MJ/m²) para níveis de censura de 60% e 50%. Para o período de inverno + primavera (145,6 MJ/m²), o geotêxtil analisado apresenta a probabilidade de retenção de resistência em 50% (manutenção de sua meia-vida) igual a 99,4%. Contudo, para os demais períodos acumulados (219,9 e 282,3 MJ/m²), as probabilidades de retenção são iguais a 4,7% e zero, respectivamente.

A Tabela 29 sumariza os parâmetros obtidos pelo teste de aderência à distribuição Weibull por Kolmogorov-Smirnov para os resultados amostrais de fluência à tração e intemperismo como etapa preliminar à análise de confiabilidade por probabilidades de falha [$F(UV)$] e de sobrevivência [$S(UV)$]. Os resultados amostrais também se aderem à distribuição Weibull, assim como à distribuição normal (Tabela 21).

Destaca-se que os parâmetros de forma (δ) e de escala (α) indicados na Tabela 29 foram obtidos por dados amostrais para cada um dos tempos de exposição isoladamente. Isto justifica os valores altos e não-usuais em comparação aos indicados na Figura 44, os quais são obtidos para todo o conjunto de dados analisados ao longo do tempo.

Tabela 29 - Teste de aderência à distribuição Weibull, com nível de confiança de 95%, para os resultados amostrais de fluência à tração e intemperismo simultâneos.

Kolmogorov-Smirnov						
Períodos ¹	Réplicas	Estatística de teste calculado ($D_{\text{calculado}}$)	p-valor	Parâmetro de forma (δ)	Parâmetro de escala (α)	Parecer ²
I	R1	0,126	0,99	55,985	38,668	H ₀ não rejeitada
	R2	0,275	0,36	55,215	38,047	H ₀ não rejeitada
I + P	R1	0,241	0,52	41,187	31,441	H ₀ não rejeitada
	R2	0,212	0,68	21,605	32,635	H ₀ não rejeitada
I + P + V	R1	0,165	0,90	26,338	26,966	H ₀ não rejeitada
	R2	0,100	0,99	52,438	27,730	H ₀ não rejeitada
I + P + V + O	R1	0,178	0,85	33,500	25,049	H ₀ não rejeitada
	R2	0,171	0,88	28,266	25,205	H ₀ não rejeitada

OBSERVAÇÕES: ¹I (Inverno), P (Primavera), V (Verão) e O (Outono); ²A partir da estatística de teste tabelado ($D_{\text{tabelado}} = 0,409$), H₀ não é rejeitada se: $D_{\text{calculado}} < D_{\text{tabelado}}$ e p-valor > 0,05.

Fonte: a autora.

A Tabela 30 sumariza os parâmetros da distribuição Weibull para censuras de 80% e 60% da resistência à tração máxima ($T_{\text{máx}}$). Na Figura 103 tem-se análise por regressão linear para a obtenção do parâmetro de forma (δ) indicado na Tabela 30.

Tabela 30 - Obtenção de parâmetros da distribuição Weibull.

Censura	Períodos de exposição ¹	Radiação UV estimada (MJ/m ²)	Classificação mediana – F(UV)	Eixo Y	Eixo X	Parâmetros Weibull ²	
						Forma (δ)	Escala (α)
80% $T_{\text{máx}}$	I	72,1	0,16	-1,75	4,28	8,20	5,35
	I + P	145,6	0,39	-0,72	4,98		
	I + P + V	219,9	0,61	-0,05	5,39		
	I + P + V + O	282,3	0,84	0,61	5,64		
60% $T_{\text{máx}}$	I + P	145,6	0,21	-1,47	4,98	15,25	5,49
	I + P + V	219,9	0,50	-0,37	5,39		
	I + P + V + O	282,3	0,79	0,46	5,64		

*OBSERVAÇÕES: ¹I (inverno), P (primavera), V (verão), O (outono); ² δ obtido pela equação de regressão apresentada na Figura 103, assim como o emprego do coeficiente linear para a determinação de $\alpha = \exp \left[\frac{-y_0}{\delta} \right]$.

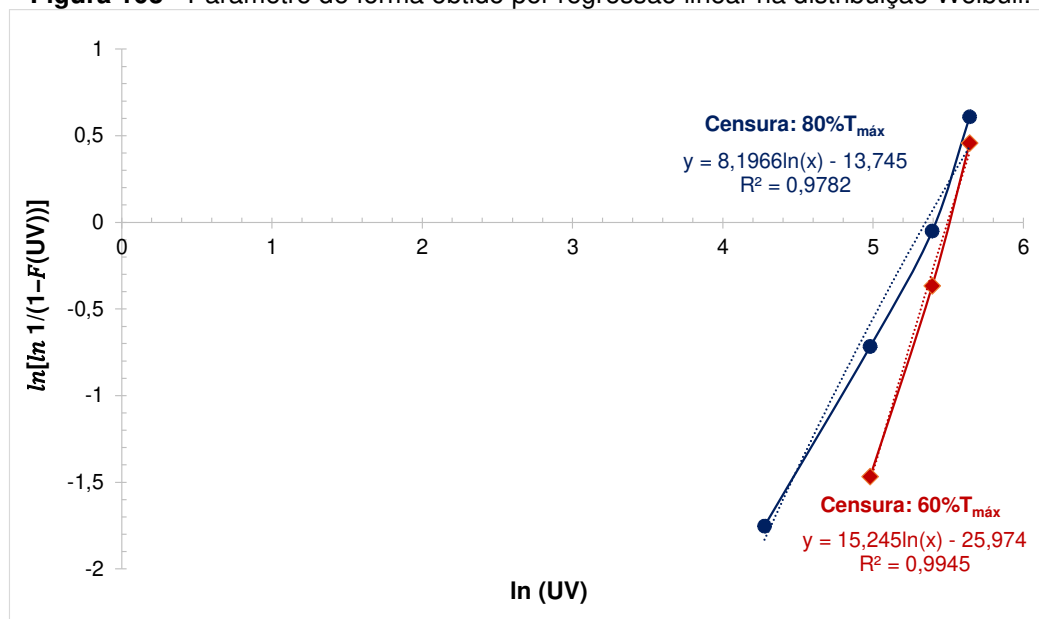
Fonte: a autora.

Ressalta-se a obtenção dos parâmetros da distribuição Weibull são em função da radiação UV estimada e classificação mediana e, portanto, não dependem diretamente dos resultados de resistência à tração retidos, embora foram ponderados para as definições das censuras. Deste modo, as inferências realizadas para as probabilidades de falha e de sobrevivência foram a partir dos resultados entre as réplicas R1 e R2, que apresentaram aderências à referida distribuição de probabilidade (Tabela 29).

Para a probabilidade de falha com censura de 80% ($T_{\text{máx}} < 45,4$ kN/m), os dados amostrais analisados correspondem ao período de inverno (isoladamente) e os demais três períodos de exposição acumulados. A censura de 60% ($T_{\text{máx}} < 34,0$ kN/m)

engloba apenas resultados amostrais dos três períodos de exposição acumulados. Ou seja, o resultado médio amostral de resistência à tração retida para o inverno isoladamente (38,3 kN/m) é superior ao intervalo de censura analisado. Apesar de apenas os três conjuntos de dados amostrais serem analisados, a censura de 60% de $T_{\text{máx}}$ apresenta pertinência em termos de resistência à tração retida para períodos máximos de exposição ao intemperismo, sumarizado na Tabela 5.

Figura 103 - Parâmetro de forma obtido por regressão linear na distribuição Weibull.



Fonte: a autora.

A Tabela 31 apresenta as probabilidades de falha $[F(UV)]$ e de sobrevivência $[S(UV)]$ calculados por distribuição Weibull. Verificam-se que, para ambos os níveis de censura de 80% e 60%, as probabilidades de $F(UV)$ e de $S(UV)$ são de 100% e 0%, respectivamente. Os referidos resultados estão de acordo com as inferências probabilísticas obtidas na Tabela 28 a partir de inferências por distribuição normal.

Tabela 31 - Parâmetros das probabilidades de falha e de sobrevivência.

Censura	Períodos de exposição ¹	Parâmetro X: Radiação UV estimada (MJ/m ²)	Probabilidade de Falha Y: $F(UV)$ ²	Probabilidade de Sobrevivência Y: $S(UV) = 1 - F(UV)$
80% $T_{\text{máx}}$	I	72,1	100%	0%
	I + P	145,6		
	I + P + V	219,9		
	I + P + V + O	282,3		
60% $T_{\text{máx}}$	I + P	145,6	100%	0%
	I + P + V	219,9		
	I + P + V + O	282,3		

OBSERVAÇÕES: ¹I (inverno), P (primavera), V (verão), O (outono); ²Distribuição Weibull dada por: $F(UV) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\delta}$, com substituição t por radiação UV incidente estimada (MJ/m²).

Fonte: a autora.

Posto isto, a referida análise de confiabilidade indicou projeções probabilísticas de falha e de sobrevivência a partir da manutenibilidade de resistências à tração por estimativas de exposição à radiação ultravioleta. Este fator de degradação por intemperismo é considerado o mais agravante para a durabilidade de geossintéticos em aplicações expostas.

Conforme discorrido em análises anteriores, a radiação ultravioleta não atua isoladamente, mas sim no contexto de cada dinâmica climática local, bem como ao período e época do ano em que os geossintéticos são utilizados para o desempenho de suas propriedades disponíveis. Portanto, o dimensionamento das propriedades disponíveis deve considerar critérios de confiabilidade (f_s) conjuntamente a escolha de fatores de redução parciais (FR_p) apropriados às condições de uso e solicitações.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A durabilidade dos geossintéticos é uma temática emergente e necessária na engenharia civil e geotécnica, tais como projetos que visam o desenvolvimento sustentável a atual e futuras gerações por inúmeras possibilidades técnicas. A sua holística é complexa por envolver o uso de materiais poliméricos industrializados que, mesmo pelo conhecimento do polímero base de fabricação, o comportamento destes materiais é dependente de diversos fatores, que em grande parte atuam sinergicamente e de forma não padronizada.

Nas duas últimas décadas, têm-se percebido o avanço nos estudos da durabilidade dos geossintéticos pela integração entre instituições de ensino, fabricantes e projetistas, além de aplicações que visam substituições parciais e totais de materiais convencionais por inúmeros geossintéticos disponíveis. Contudo, há ainda perguntas a serem respondidas, principalmente em aplicações com interações distintas entre os fatores degradantes e para vida de serviço de projeto de médio e longos prazos. Paralelamente, há também o constante surgimento de novos produtos e o melhoramento de produtos já empregados na engenharia com geossintéticos.

Por exemplo, aplicações de tubos geotêxteis para desaguamento e confinamento de resíduos gerados em diversos processos industriais e que podem conter elementos contaminantes. A ruptura por degradação pode gerar um passivo ambiental caso os resíduos tenham potencial poluidor, como resíduos industriais e de mineração. Cita-se os entupimentos dos sistemas de drenagem para a parcela líquida desaguada, contaminação de solos e mananciais hídricos. Ressalva-se que os impactos dependem do potencial contaminante do resíduo, concentração de sólidos, volume total bombeado e local de disposição dos tubos geotêxteis, como topografia e proximidade com mananciais hídricos, dentre outros. Isto evidencia a relevância de pesquisas continuadas para a compreensão da durabilidade de geossintéticos às inúmeras solicitações ambientais e de uso.

Esta pesquisa, ao se estimar a durabilidade em ensaios não convencionais sob sinergismo de fluência à tração e intemperismo de campo, apresenta como desafio o entendimento generalista de fatores de degradação e os seus níveis de atuação. Ensaios de degradação natural englobam a compreensão da dinâmica climática local e exposições mais longas para a obtenção de resultados representativos. As variáveis

envolvidas não são constantes e a sua interpretação depende dos períodos iniciais e intervalos avaliados, bem como o conhecimento histórico prévio do local de exposição, mesmo que estes não se mantêm constantes. Há outros fatores que modificam as características típicas da dinâmica climática, assim como eventos climáticos extremos que vêm ocorrendo devido às inúmeras ações antrópicas no meio ambiente.

Destaca-se que ensaios de degradação acelerados apresentam relevância na obtenção de parâmetros de durabilidade em menores intervalos de tempo e condições de testes com variáveis controladas. Ou seja, não objetivam extrapolar resultados à realidade de campo, cujas abordagens podem induzir a erros em dimensionamentos racionais. Em outras palavras, os parâmetros obtidos em campo e laboratório se complementam e agregam no entendimento da durabilidade dos geossintéticos, e de demais materiais, as inúmeras possibilidades de projetos de engenharia civil. Importante mencionar sobre a relevância de parâmetros obtidos por exumações de geossintéticos, em conjunto ao monitoramento das condições de contorno ao longo do tempo, os quais têm agregado em conhecimentos nesta temática.

Em aplicações de campo, existe um consenso na seleção de materiais com análise de suscetibilidade à degradação de acordo com sua constituição polimérica e estrutura geossintética. Neste contexto, a pesquisa visou ampliar o conhecimento nas alterações de resistência à tração (kN/m) e deformação (%) nas condições de contorno avaliadas para inferir sobre os FR_p , assim como probabilidades de durabilidade por níveis de censuras e em termos de probabilidades de falha $[F(UV)]$ e de sobrevivência $[S(UV)]$.

O geotêxtil tecido de polipropileno submetido a degradação por intemperismo e fluência à tração indicou a ocorrência de sinergismo e alterações nas propriedades mecânicas ao longo do tempo de exposição. A seguir, enumeram-se as principais inferências obtidas neste estudo:

- a dinâmica climática no início das exposições tende a exercer significativa influência no comportamento nas propriedades ao longo do tempo. Isto pode agregar em especificações de projeto quanto ao uso de geossintéticos expostos às intempéries. Também, a sua relevância no dimensionamento das propriedades disponíveis superiores as propriedades requeridas em aplicações acima do solo em conjunto a atuais mudanças climáticas observadas

principalmente nos últimos anos, como aumentos nos índices de ultravioleta e de temperaturas médias diárias;

- os resultados similares entre as réplicas analisadas, o planejamento experimental baseado na variabilidade do material analisado e as inferências amostrais e populacionais são de suma importância na compreensão das variáveis resposta obtidas;
- a ação simultânea de fluência à tração e intemperismo ocasionou perdas de resistência com o alcance da meia-vida do geotêxtil tecido de polipropileno em 273 dias (média de 52,5%). Para o mesmo período de exposição, a perda de resistência à tração por intemperismo isolado foi de 37,8%;
- os aumentos do módulo de tração (ou rigidez) para os maiores períodos de exposição ocasionaram alterações nas curvas de resistência à tração *versus* deformação, assim como em menores percentuais de deformações finais por fluência medidos na superfície dos geotêxteis, mesmo para os maiores períodos de exposição com carga constante de fluência;
- as taxas de fluência (b) mantiveram-se próximas entre os períodos acumulados de exposição em campo. Para a fluência em laboratório, o parâmetro foi inferior em comparação ao período de inverno, ambos realizados em 93 dias, bem como uma menor alteração no módulo de rigidez em comparação ao resultado de campo. Este comportamento, juntamente a manutenção da resistência à tração por fluência em laboratório, indica o quanto a degradação por dinâmica climática modifica o comportamento de fluência à tração;
- os ensaios de fluência à tração com inclinação de 22° não comprometeram a transferência da carga por sistemas de roletes em alumínio. A metodologia aplicada se mostrou eficaz no estudo de durabilidade por sinergismo e, portanto, a validação do ensaio de fluência à tração não convencional, nas condições de contorno apresentadas. Este estudo pode ser aplicado a demais geotêxteis e produtos correlatos aos geotêxteis;
- há ocorrência de sinergismo de degradação pela ação simultânea de fluência à tração e intemperismo. Resultados obtidos no inverno (93 dias) indicaram a manutenção da resistência à tração média em laboratório (56,9 kN/m), ao contrário das resistências obtidas médias por intemperismo isolado (40,9 kN/m) e fatores de degradação simultâneos (R1: 38,3 kN/m; R2: 37,6 kN/m);

- os resultados supracitados indicam que, a princípio, o fator de degradação por intemperismo foi o mais agravante em comparação a fluência à tração para carregamento de 15% em menor período analisado (93 dias). Contudo, os resultados de perdas de resistências à tração por intemperismo isolado (40,6%) e sinergismo (56,6%) em 365 dias supõem que a solicitação mecânica de fluência à tração altera os processos de degradação por intemperismo em maiores períodos de exposição por sinergismo. Demais estudos de fluência à tração inclinada em laboratório (por exemplo, 365 dias) são necessários para a referida inferência;
- a obtenção dos modelos matemáticos linear-log por regressão linear é particular às condições de contorno analisadas. Contudo, são de suma importância na compreensão dos complexos mecanismos de degradação, como para degradação natural e simultaneidade de fatores de degradação;
- os fatores de redução parciais (FR_p) obtidos indicaram similaridades a valores reportados na literatura. A adoção de FR_p mais próximas aos requisitos ambientais e de projeto são essenciais em dimensionamentos menos conservadores e que garantem as propriedades disponíveis durante a vida de serviço de projeto. Ressalva-se os FR_p obtidos são apenas para fins de pesquisa e nas condições de contorno analisadas e que mais estudos são necessários;
- as inferências probabilísticas e de confiabilidade agregam em tomadas de decisões de incertezas inerentes às condicionantes do projeto (fs) para se garantir a manutenibilidade das propriedades admissíveis dos geossintéticos por critérios de dimensionamento racional e com confiabilidade;
- as probabilidades de falha [$F(UV)$] e de sobrevivência [$S(UV)$] por distribuição Weibull em função de radiação UV estimada incidente são propostas relevantes em aplicações de geossintéticos ao intemperismo. Para tanto, requer a adequada estimativa da radiação ultravioleta (UV) incidente em relação à radiação solar global (G) baseados em estudos preliminares da literatura ou por demais recomendações aplicáveis ao local de estudo ou de emprego dos geossintéticos;

- a incorporação de aditivos químicos que minimizem a ocorrência de fotodegradação é realidade na manufatura de geossintéticos direcionados a esse fim, cuja temática não foi avaliada neste estudo de caso.

Como inovações da pesquisa, enumeram-se:

- proposta e validação de pórticos para o estudo de efeitos isolados e em conjunto de fatores de degradação por fluência à tração e intemperismo de campo. Conforme listado no item 1.4, resultados preliminares de fluência à tração inclinada em campo foram publicados em Guimarães *et al.* (2017), que englobou níveis de cargas de 5% e 10% da resistência à carga máxima e período de exposição de 90 dias (20/05/2015 a 18/08/2015);
- estimativa da razão UV/G baseado nas condições territoriais (por exemplo, UV/G de 4,2%, conforme pesquisas publicadas por Escobedo *et al.*, 2011; Escobedo *et al.*, 2014; Leal; Tíba; Piacentini, 2011) em estudos de durabilidade por intemperismo, diferente do que é recomendado na literatura de geossintéticos;
- exposições por fluência à tração e intemperismo de campo por estações climáticas e em ciclo anual.

Os resultados desta pesquisa visam contribuir em um melhor entendimento da durabilidade por sinergismo dos fatores de degradação para subsidiar em tomadas de decisões racionais que envolvem impactos sociais, ambientais e técnicos. Por último, agregar no crescimento da engenharia com geossintéticos em projetos balizados no desenvolvimento sustentável a atual e futuras gerações frente às ações antrópicas no meio ambiente.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em detrimento da pertinência e contribuição técnica do tema proposto, sugere-se a abordagem dos seguintes itens como encaminhamento deste trabalho:

- compreender a influência do sinergismo em termos de propriedades hidráulicas em geotêxteis solicitados por fluência à tração e intemperismo, como em aplicações de tubos geotêxteis;
- avaliar a correlação entre a espessura e o comportamento sob fluência à tração e intemperismo;

- avaliar a ação de aditivos aos mecanismos de degradação;
- analisar o comportamento de fluência à tração em laboratório em maiores períodos (por exemplo, 365 dias), de modo a avaliar o quanto a solicitação mecânica por fluência à tração altera a degradação por sinergismo ao se atingir perdas de resistência superiores a 50% (meia vida);
- realizar ensaios de durabilidade por sinergismo com o início das exposições nas demais estações climáticas e entre anos consecutivos, bem como em geotêxteis de demais matrizes poliméricas;
- correlacionar parâmetros microestruturais poliméricos aos parâmetros mecânicos por ensaios de resistência à tração retidos;
- realizar ensaios de fluência acelerada em laboratório por meio de fatores e níveis sob condições controláveis, de modo a obter variáveis respostas para inferências probabilísticas e estatísticas complementares aos ensaios de campo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, S.R. **Geotextile durability**. In: KOERNER, R.M. (coord). Geotêxteis: from design to applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. Cap. 9, pp. 177-215.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1435**: Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5035**: Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method). ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5262**: Standard Test Method for Evaluating the Unconfined Tension Creep and Creep Rupture Behavior of Geosynthetics. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5272**: Standard Practice for Outdoor Exposure Testing of Photodegradable Plastics. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5819**: Standard Guide for Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5970**: Standard Test Method for Deterioration of Geotextiles from Outdoor Exposure. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6992**: Standard Test Method for Accelerated Tensile Creep and Creep-Rupture of Geosynthetic Materials Based on Time-Temperature Superposition Using the Stepped Isothermal Method. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G7/G7M**: Standard Practice for Natural Weathering of Materials. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 166**: Standard Guide for Statistical Analysis of Service Life Data. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 172**: Standard Guide for Statistical Analysis of Accelerated Service Life Data. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2019.
- ANDRADE, F.C.M. Estimativa da transmissividade atmosférica para o estado do Ceará. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2007. São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2007.
- ARUTYUNYAN, R.A. Creep fracture of nonlinear viscoelastic media undergoing UV radiation. **International Journal of Fracture**, v. 132, p. L3-L8, 2005.
- ASSINDER, P.J.; BREYTENBACH, M.; WIEMERS, J.; HORTKORN, F. Utilizing geotextile tubes to extend the life of a Tailings Storage Facility. In: FIRST SOUTH AFRICAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 2016, Sun City, South Africa. **Anais [...]**. Geotechnical Division of the South African Institution of Civil Engineering (SAICE), May 5-6, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS. **Recomendação IGSSBrasil 002-1**: Características requeridas para o emprego de geossintéticos: parte 1: geotêxteis e produtos correlatos. IGB Brasil, São Paulo, São Paulo, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS. **Recomendação IGSSBrasil 003**: Termos e definições complementares. IGB Brasil, São Paulo, São Paulo, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS. **Recomendação IGSSBrasil 004**: Aplicação de geossintéticos em áreas de disposição de resíduos. IGB Brasil, São Paulo, São Paulo, 2016.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10318-1**: geossintéticos: parte 1: termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10319**: geossintéticos: ensaio de tração faixa larga. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10320**: Geossintéticos: identificação na obra. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10321**: geossintéticos: ensaio de tração de emendas pelo método da faixa larga. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 13431**: geotêxteis e produtos correlatos: determinação do comportamento em deformação e na ruptura por fluência sob tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16757-1**: Geossintéticos: requisitos para aplicação: parte 1: geotêxteis e produtos correlatos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16757-2**: Geossintéticos: requisitos para aplicação: parte 2: barreiras geossintéticas. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16920-1**: Muros e taludes em solos reforçados: parte 1: solos reforçados em aterros. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BARAS, L.C.C.; BUENO, B.S.; COSTA, C.M.L. On the evaluation of stepped isothermal method for characterizing creep properties of geotextiles. *In*: 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 2002, Nice. **Anais** [...]. Nice, 2002.

BARBIERI, J.C. **Desenvolvimento e meio ambiente: as estratégias de mudanças da agenda 21**. Petrópolis: Vozes, 1997.

BERTAGNOLLI, C.; PERES, R.S.; CARBONE, S.; MANFRO, R.L.; PINHEIRO, D.K.; SCHUCH, A.A.M.P.; NOZAWA, H.; YAMAMOTO, H.; SCHUCH, N.J. Estimativa para cálculo de ozônio total usando dados de UVB e UVA do Observatório Espacial do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, 25, Supl. 2, p. 9-15, 2007.

BEZUIJEN, A.; VASTENBURG, E.W. **Geosynthetics. Design rules and applications**. Deltares: CRC Press, 2013. 166 p.

BRAND, E.W.; PANG, P.L.R. Durability of geotextiles to outdoor exposure in Hong Kong. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 117, n. 7, p. 979-1000, 1991.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 5 de outubro de 1988. 1988.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudanças do Clima - PNMC e dá outras providências**. Brasília, DF: Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 29 de dezembro de 2009. 2009.

BUENO, B.S.; COSTANZI, M.A.; ZORNBERG, J.G. Conventional and accelerated creep tests on nonwoven needle-punched geotextiles. **Geosynthetics International**, v. 12, n. 6, p. 276-287, 2005.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Propriedades, ensaios e normas**. *In*: VERTEMATTI, J.C. (coord.). Manual Brasileiro de Geossintéticos. São Paulo: Blucher, 2015, cap. 3, p. 47-84.

CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests. **Geosynthetics International**, v. 18, n. 3, p. 90-103, 2011.

- CAREY, M.B.; KOENIG, R.H. Reliability Assessment Based on Accelerated Degradation: A Case Study. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 40, n 5, p. 499-506, 1991.
- CARNEIRO, José Ricardo da Cunha. **Durabilidade de Materiais Geossintéticos em Estruturas de Carácter Ambiental - A Importância da Incorporação de Aditivos Químicos**. 2009. 602 f. Tese (Doutorado) – Universidade do Porto, Portugal, 2009.
- CARNEIRO, J.R.; ALMEIDA, P.J.; LOPES, M.L. Some synergism in the laboratory degradation of a polypropylene geotextile. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 586-591, 2014.
- CARNEIRO, J.R.; LOPES, M.L. Natural weathering of polypropylene geotextiles treated with diferente Chemical stabilisers. **Geosynthetics International**, v. 24, n. 6, p. 544-553, 2017.
- CARNEIRO, J.R.; MORAIS, M.; LOPES, M.L. Degradation of polypropylene geotextiles with different stabilizations in marine environments. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 877–886, 2018.
- CAZZUFFI, D.; GIOFFRÈ, D. Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, 130-136, 2020.
- CIENTFUEGOS, F.; VAITSMAN, D. **Análise Instrumental**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. 606 p.
- CLIMATE-DATA.ORG. Varginha Clima (Brasil). Oedheim, [2021]. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/minas-gerais/varginha-25010/> >. Acesso em: 20 fev. 2021.
- COARITI, J.R.; FERNANDEZ, J.H.; SPYRIDES, M.H.C.; CORRÊA, M.P.; LEME, N.P.; PEDRA, G.U.; SILVA, F.R. Metodologia para validação de dados coletados por espectrofotômetros Brewer. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 2, p. 601-611, 2018.
- COOKE, T.; REBENFELD, L. Effect of Chemical composition and physical structure of geotextiles on their durability. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, p. 7-22, 1988.
- CORBELLA, S.; STRETCH, D.D. Geotextile sand filled containers as coastal defence: South African experience. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 35, p. 120-130, 2012.
- CORRÊA, M.P. Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 90, n. 3, p. 297-313, 2015.
- COSTANZI, M.A.; BUENO, B.S.; BARAS, L.C.S.; ZORNBERG, J.G. Avaliação da Fluência de Geotêxteis não Tecidos com Ensaios Acelerados. **Solos & Rochas**, v. 26, n. 3, p. 217-228, 2003.
- DE PAOLI, M.A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. Chemkeys: Editado por João Carlos de Andrade. 2ª versão on-line (revisada), 2008. 228 p.
- DEN HOEDT, G. Creep and Relaxation of Geotextile Fabrics. **Geotextiles and Geomembranes**, n. 4, p. 83-92, 1986.
- DIERICKX, W.; BERGHE, P.V.D. Natural weathering of textiles used in agricultural applications. **Geotextile and Geomembranes**, n. 22, p. 255-272, 2004.
- DIAS FILHO, J.L.E.; MAIA, P.C.; XAVIER, G.C. Spectrophotometry as a tool for characterizing durability of woven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, n. 47, p. 577-585, 2019a.
- DIAS FILHO, J.L.E.; MAIA, P.C.; XAVIER, G.C. A short-term model for extrapolating unconfined creep deformation data for woven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, n. 47, p. 792-797, 2019b.
- DÍAZ JUNIOR, A.H.; TMPSON, C.; ASCENCIO, J.; STEPHENS, T. **Riverbank erosion protect using engineered geosynthetics in Mexico**. Geosynthetics. IFAI Publication. Disponível em: <https://geosyntheticsmagazine.com/2018/02/01/riverbank-erosion-protection-using-engineered-geosynthetics/>. Acesso em: 19 abr. 2021. 1 de fevereiro de 2018.
- DIXON, N.; FOWMES, G.; FROST, M. Global challenges, geosynthetics solutions and counting carbon. **Geosynthetics International**, v. 24, n. 5, p. 451-464, 2017.
- DOBIE, M. Design parameters and specification for geosynthetic reinforcement. In: GEOSYNTHETICS CONFERENCE, GEOSINTETIK INDONESIA, 2016, Jakarta. **Anais**, pp. 73-86. Jakarta, 2016.
- ESCOBEDO, J.F.; GOMES, E.N.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, p. 299-309, 2009.

- ESCOBEDO, J.F.; GOMES, E.N.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. **Renewable Energy**, v. 36, p. 169-178, 2011.
- ESCOBEDO, J.F.; RODRIGUES, D.; DAL PAI, A.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Irradiações UV, PAR e IV médias mensais em Botucatu/SP/Brasil. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 16, p. 85-92, 2012.
- ESCOBEDO, J.F.; DAL PAI, A.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J.; DAL PAI, E. Diurnal and anual Evolution of UV, PAR and NIR irradiances in Botucatu/Brazil. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1130-1139, 2014.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 12224**. Geotextiles and geotextile-related products – Determination of the resistance to weathering. European Committee for Standardization. Brussels, 2000.
- EUROPEAN STANDARD. **EN 13362**. Geosynthetic barriers. Characteristics required for use in the construction of canals. European Committee for Standardization. Brussels, 2018.
- FECHINE, G.J.M.; SANTOS, J.A.B.; RABELLO, M.S. Avaliação da fotodegradação de poliolefinas através de exposição natural e artificial. **Química Nova**, v. 29, n 4, p. 674-680, 2006.
- FOURIE, A.B.; ADDIS, P.C. Changes in filtration opening size of woven geotextiles subjected to tensile loads. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 17, p. 331-340, 1999.
- FOURIE, A.B.; KUCHENA, S.M. The influence of tensile stresses on the filtration characteristics of geotextiles. **Geosynthetics International**, v. 2, n. 2, p. 455-471, 1995.
- FRANÇA, F.A.N.; BUENO, B.S.; ZORNBERG, J.G. Ensaios confinados e acelerados de fluência em geossintéticos. **Fundações & Obras Geotécnicas**, p. 56-63, 2011.
- FRANCO, J.M.; FERNANDES, G.A.; CORRÊA, M.P.; SILVA, L.F. Exposição do trabalhador rural à radiação ultravioleta: estudo no Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, n. 18, p. 53-62, 2016.
- FREITAS, M.A.; COLOSIMO, E.A. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, 1997. 309 p.
- FREITAS, M.A.; TOLEDO, M.L.G.; COLOSIMO, E.A.; PIRES, M.C. Using Degradation Data to Assess Reliability: A Case Study on Train Wheel Degradation. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 25, p. 607-629, 2008.
- GORJIAN, N.; MA, L.; MITTINTY, M.; YARLAGADDA, P.; SUN, Y. A review on degradation models in reliability analysis. In: 4TH WORLD CONGRESS ON ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 2009, Greece. **Anais [...]**. Greece, 2009.
- GREENWOOD, J.H.; CURSON, A. Life prediction of the oxidation of geogrids by three different methods. **Geotextile and Geomembranes**, v. 34, p. 93-99, 2012.
- GREENWOOD, J.H.; SCHROEDER, H.F.; VOSKAMP, W. **Durability of Geosynthetics**. Report 243. CUR committee C 187– Building & Infrastructure, 2012. 295 pages.
- GUIMARÃES, M.G.A.; URASHIMA, D.C.; CASTRO, C.A.C.; LOPES, M.L.C. Durability of a Polypropylene Woven Geotextile under Climatic and Chemical Agents. **Modern Environmental Science and Engineering**, v. 1, p. 172-177, 2015.
- GUIMARAES, M.G.A.; URASHIMA, D.C.; VIDAL, D.M.; CASTRO, C.A.C. Influência das exposições aberta e fechada na durabilidade de geossintéticos sob intempéries. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 37031-37049, 2020.
- GUIMARÃES, M.G.A.; URASHIMA, D.C.; VIDIGAL, T.L.C.; MENDONÇA, V.M.; CASTRO, C.A.C. Resistance of a woven polypropylene geotextile to acid and alkaline liquids. In: 5TH EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONGRESS, 2012, Valencia. **Anais [...]**. Valencia, 2012.
- GUIMARÃES, M.G.A.; VIDAL, D.M.; URASHIMA, D.C.; CASTRO, C.A.C. Degradation of polypropylene woven geotextile: tensile creep and weathering. **Geosynthetics International**, v. 24, p. 213-223, 2017.
- GUO, W.; CHU, J.; ZHOU, B. Method to increase seam efficiency for woven geotextile materials. **Geosynthetics International**, v. 22, n. 6, p. 404-410, 2015.
- HAGE JÚNIOR, E. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros**, v. 8, n. 2, p. 6-9, 1998.

- HORNSEY, W.P.; CARLEY, J.T.; COGHLAN, I.R.; COX, R.J. Geotextiles sand container shoreline protection systems: Design and application. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, p. 425-439, 2011.
- HORNSEY, W.; SERVICE, B. A major failure involving an exposure geotextile to contain dredged spoil. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 45, p. 548-555, 2017.
- HSIEH, C.; WANG, J. B.; CHIU, Y. F. Weathering properties of geotextiles in ocean environments. **Geosynthetics International**, v. 13, p. 210-217, 2006.
- HSUAN, Y. G.; SCHROEDER, H. F.; ROWE, K.; MÜLLER, W.; GREENWOOD, J.; CAZZUFFI, D.; KOERNER, R. M. Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics. Keynote Paper. In: 4TH EUROPEAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE, 2008, Edinburgh. **Anais [...]**. Edinburgh, 2008.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Perspectivas sobre as negociações de mudança climática e seus impactos na política brasileira**. Comunicados do Ipea, IPEA N°45. IPEA. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. 22 de abril de 2010. 2010.
- INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY. **Preparar o terreno para um futuro promissor**. Como é que os geossintéticos servem a sociedade após meio século. 2021. Disponível em: https://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/2021/10/IGS_Ebook_Portuguese_V4.pdf. Acesso em: 15 julho 2022.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 877-1**: Plastics - Methods of exposure to solar radiation — Part 1: General guidance. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 877-2**: Plastics — Methods of exposure to solar radiation — Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13431**: Geotextiles and geotextile-related products — Determination of tensile creep and creep rupture behaviour. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13437**: Geosynthetics – Installing and retrieving samples in the field for durability assessment. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2019.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 13434**: Geosynthetics - Guidelines for the assessment of durability. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2020.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TR 20432**: Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2022.
- KARADEMIR, T.; FROST, J.D. Micro-scale tensile properties of single geotextile polypropylene filaments at elevated temperatures. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 42, p. 201-213, 2014.
- KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, K. Correlation between the results of creep and relaxation tests of geotextiles. **Geosynthetics International**, v. 12, p. 269-275, 2005.
- KIFFLE, Z.B.; BHATIA, S.K.; LEBSTER, G.E. Dewatering of mine tailing slurries using geotextile tube: case histories. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, 10p, 2023.
- KOCKOTT, D. Natural and artificial weathering of polymers. **Polymer Degradation and Stability**, v. 25, p. 181-208, 1989.
- KOERNER, R. M. **Design with geosynthetics**. 5th edition. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2005.
- KOERNER, R. M. **Design with geosynthetics**. 6th edition. Indiana: Xlibris Corporation, 2012.
- KOERNER, R.M.; HSUAN, Y.G.; KOERNER, G.R. Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. **Geosynthetics International**, v. 24, n. 2, p. 198-212, 2017.
- KOERNER, G. R.; HSUAN, G.; KOERNER, R. M. Photo-Initiated Degradation of Geotextiles. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. December, p. 1159-1166, 1998.

KOO, H.J.; CHO, H.W.; CHOI, S.W.; KIM, S.H. Comparison of various creep aspects for determining creep reduction factors of geogrids. *In: THE FIRST PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION*, 2008, Cancun. **Anais [...]**. Cancun, 2008.

LA MANTIA, F.P.; BIONDO, M.; CERAULO, M.; MISTRETTA, M.C. In-line monitoring of the photooxidation behavior of a PP/clay nanocomposite through creep measurements. **Polymer Degradation and Stability**, v. 130, p. 271-276, 2016.

LAWSON, C.R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. **Geosynthetics International**, v. 15, p. 384-427, 2008.

LAWSON, C.R. **Geotextiles in marine engineering**. In: KOERNER, R.M. (coord). *Geotêxtil: from design to applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. Cap. 20, pp. 434-482.

LAWSON, C.R. Geosynthetics for riverbank and coastal protection in Asia. *In: FIFTH ASIAN REGIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS*, 2012, Bangkok. **Anais [...]**. Bangkok, 2012.

LEAL, S.S.; TÍBA, C.; PIACENTINI, R. Daily UV radiation modeling with the usage of statistical correlations and artificial neural networks. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3337-3344, 2011.

LEECH, A.D. Geotextiles long term durability – product design parameters. *In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS*, 2010, Guarujá. **Anais [...]**. Guarujá, 2010.

LESHCHINSKY, B.; BERG, R.; LIEW, W.; KAWAKAMI-SELIN, M.; MOORE, J.; BROWN, S.; KLEUTSCH, B.; GLOVER-CUTTER, K.; WAYNE, M. Characterization of geogrid mechanical and chemical properties from a thirty-six year old mechanically-stabilized earth wall. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, p. 793–801, 2020.

LESHCHINSKY, D.; LESHCHINSKY, O. **GeoCoPS (2.0): supplemental notes**. Newark: ADAMA Engineering, Inc, 2002.

LESHCHINSKY, D.; LESHCHINSKY, O.; LING, H.I.; GILBERT, P.A. Geosynthetic Tubes for Confining Pressurized Slurry: Some Design Aspects. **Journal of Geotechnical Engineering**, p. 682-690, 1996.

LI, M.; HSUAN, Y. G. Temperature and pressure effects on the degradation of polypropylene tape yarns-depletion of antioxidants. **Geotextile and Geomembranes**, v. 22, p. 511-530, 2004.

LI, J.; CUI, X.; JIN, Q.; SU, J.; CUI, S.; WANG, Y. Laboratory investigation of the durability of a new smart geosynthetic material. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 28-33, 2018.

LILLIEFORS, H.W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. **Journal of the American Statistical Association**, v. 62, n. 318, p. 399-402, 1967.

LODI, P.C.; BUENO, B. S.; COSTA, C. L. M.; ZORNBERG, J. G. Degradation of Geotextiles after Weathering Exposure. *In: THE FIRST PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION*, 2008, Cancun. **Anais [...]**. Cancun, 2008.

LOPES, M.P.; LOPES, M.L. **A Durabilidade dos Geossintéticos**. Porto: FEUP Edições, 2010. 294 p.

LOPES, M.G.; BARROSO, M. **Matéria-prima, processos de fabrico e classificação**. In: LOPES, M.G.; BARROSO, M.; NEVES, J. (coord). *Geossintéticos em engenharia civil: dimensionamento, instalação e casos de obra*. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Laboratório Nacional de Geotecnia, 2021. Cap. 1, pp. 1-15.

MAIA, A.G. *Econometria: conceitos e aplicações*. Saint Paul, 2017.

MAIER, C.; CALAFUT, T. **Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook**. New York: Plastics Design Librar, 1998. 432 p.

MARQUES, L. O Antropoceno como aceleração do aquecimento global. **Liinc e Revista**, v. 18, n. 1, e5968, 20 p, 2022.

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

MEYER, P.L. **Probabilidade - Aplicações à Estatística**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC; 2012.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 15 setembro 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 19 jul. 2022.

NAVIDI, W. **Probabilidade e Estatística para Ciências Exatas**. São Paulo: AMGH; 2012.

NELSON, W. **Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analyses**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 601 p.

NEWMAN, E.J.; STARK, T.D. Ten-year PVC geomembrane durability. **Geosynthetics International**, v. 16, n. 2, p. 97–108, 2009.

PALMEIRA, E.M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 294 p.

PALMEIRA, E.M.; MELO, D.L.A.; MORAES-FILHO, I.P. Geotextile filtration opening size under tension and confinement. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, p. 566-576, 2019.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A.R.; COSTA, R.S.; LIMA, F.J.L.; RÜTHER, R.; ABREU, S.L.; TIEPOLO, G.M.; PEREIRA, S.V.; SOUZA, J.G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2ª ed., São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.

PERKINS, S.W. Constitutive modeling of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, p. 273-292, 2000.

PINTO, G.E.; PIRES, A.; GEORGES, M.R.R. O Antropoceno e a mudança climática: a percepção e a consciência dos brasileiros segundo a pesquisa IBOPE. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 54, p. 1-25, 2020.

PIZZOLATO, M. **Método de Otimização Experimental da Qualidade e Durabilidade de Produtos: Um Estudo de Caso em Produto Fabricado por Injeção de Plástico**. 2002. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PROJETEEE. Dados climáticos. Florianópolis, [2021]. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: http://projeteer.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=MG+-+Varginha&id_cidade=bra_mg_varginha.868480_inmetl. Acesso em: 20 fev. 2021.

R CORE TEAM (2021). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria**. URL <https://www.R-project.org/>.

RABELLO, M.S.; WHITE, J.R. Fotodegradação do Polipropileno. Um Processo Essencialmente Heterogêneo. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 47-57, 1997.

REGEL, V.R.; CHERNYI, N.N.; KRYZHANOVSKII, V.G.; BOBOEV, T.B. Effect of ultraviolet radiation on the creep rate of polymers. **Mekhanika Polimerov**, v. 3, n. 3, p. 404-408, 1967.

RENDER, B.; STAIR JÚNIOR, R.; HANNA, M.E. **Análise Quantitativa para Administração**. 10ª ed. Bookman, 2010.

RYAN, T. **Estatística moderna para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier; 2009.

SARSBY, R.W. (Edited by). **Geosynthetics in Civil Engineering**. The Textile Institute. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007. 308 p.

SAWICKI, A.; KAZIMIEROWICZ-FRANKOWSKA, K. Creep behavior of geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, p. 365-382, 1998.

SCAFFARO, R.; DINTCHEVA, N.T.; LA MANTIA, F.L. A new equipment to measure the combined effects of humidity, temperature, mechanical stress and UV exposure on the creep behaviour of polymers. **Polymer Testing**, v. 27, p. 49-54, 2008.

SCHALKA, S.; STEINER D.; RAVELLI, F.N.; STEINER T.; TERENA A.C.; MARÇON C.R.; et al. Brazilian Consensus on Photoprotection. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, (6 Suppl 1):S6-73, v. 89, 2014.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591-611, 1965.

- SHUKLA, S.K. **An introduction to geosynthetic engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2016. 466 p.
- SHUKLA, S.K.; YIN, J.H. **Fundamentals of Geosynthetic Engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2006. 428 p.
- SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975, 350 p.
- SMITH, W.F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Nova York: McGrawHill/Bookman, 2012.
- SUITS, L.D.; HSUAN, Y.G. Assessing the photo-degradation of geosynthetics by outdoor exposure and laboratory weatherometer. **Geotextile and Geomembranes**, v. 21, p. 111-122, 2003.
- TAKE, W.A.; ROWE, R.K.; BRACHMAN, R.W.I.; ARNEPALLI, D.N. Thermal exposure conditions for a composite linear with a black geomembrane exposed to solar radiation. **Geosynthetics International**, v. 22, n. 1, p. 93-109, 2015.
- THORNTON, J.S. *et al.* The stepped isothermal method for time-temperature superposition and its application to creep data on polyester yarn. *In*: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 1998, Atlanta. **Anais [...]**. Atlanta, 1998.
- TOUZE, N. Healing the world: a geosynthetics solution. **Geosynthetics International**, v. 28, n. 1, p. 1-31, 2021.
- TRIOLA, M.F. **Introdução à Estatística**. 10ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- URASHIMA, Beatriz Mydori Carvalho. **Metodologia para determinação da probabilidade de falha durante a vida de serviço de projeto de geossintéticos**. 2022. 62 f. Dissertação (Mestrado). Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- URASHIMA, B.M.C.; URASHIMA, D.C.; GUIMARÃES, M.G.A. Degradação de Geotêxteis de Polipropileno Expostos à Intempéries. *In*: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG 2018) - GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO, 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador, 2018.
- URASHIMA, B.M.C.; URASHIMA, D.C.; CASTRO, C.A.C.; GUIMARÃES, M.G.A. Degradação de Geotêxteis Expostos às Intempéries. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 25208-25219, 2020.
- URASHIMA, D.C.; SILVA, P.M.L.; GUIMARÃES, M.G.A.; CASTRO, C.A.C. Sinergismo de degradação em geotêxteis: ensaios laboratoriais sob fluência à tração, temperatura e incidência de radiação ultravioleta. *In*: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA (COBRAMSEG 2018) - GEOTECNIA E DESENVOLVIMENTO URBANO, 2018, Salvador. **Anais [...]**. Salvador, 2018.
- VALENTE, I.M.; CARNEIRO, J.R.; ALMEIDA, P.J.; LOPES, M.L. Chemical studies about the durability of polypropylene geotextiles. *In*: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 2010, Guarujá. **Anais [...]**. Guarujá, 2010.
- VERTEMATTI, J.C. (coordenador). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2ª ed. São Paulo: Blücher, 2015, 576p.
- WU, J.T.H. **Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Wall**. John Wiley & Sons Ltd, 2019.
- WU, C.S.; HONG, Y.S.; WANG, R.H. The influence of uniaxial tensile strain on the pore size and filtration characteristics of geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 26, p. 250-262, 2008.
- WYPYCH, G. **Handbook of Materials Weathering**, Publisher: Chem Tec Publishing, Toronto, 2008.
- YANG, X.; DING, X. Prediction of outdoor weathering performance of polypropylene filaments by accelerated weathering tests. **Geotextile and Geomembranes**, v. 24, p. 103-109, 2006.
- YEE, T.W.; CHOI, J.C. Geotextile tube application for Islan Grand Bridge Project, Korea. *In*: THE FIRST PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION, 2008, Cancun. **Anais [...]**. Cancun, 2008.
- YEON, S.S.; HSUAN, Y.G. Evaluation of creep behavior of high density polyethylene and polyethylene-

terephthalate geogrids. **Geotextile and Geomembranes**, v. 28, p. 409-421, 2010.

YOSHIMURA, P.; GUIMARÃES, M. G. A.; VIDAL, D. M. Some aspects of the durability testing for geosynthetics exposed to climatic degradation agents. In: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 2014, Berlin. **Anais [...]**. Berlin, 2014.

ZANZINGER, H.; HANGEN, H.; ALEXIEW, D. Fatigue behaviour of a PET-Geogrid under cyclic loading. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 251-261, 2010.

ZORNBERG, J.G.; BYLER, B.R.; KNUDSEN, J.W. Creep of geotextiles using time-temperature superposition methods. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 11, p. 1158-1168, 2004.

ZWEIFEL, H.; MAIER, R.D.; SCHILLER, M. **Plastics Additives Handbook**. 6th ed. München: Hanser Publications, 2009. 1222 p.

APÊNDICE A – EXEMPLOS DE REGISTROS HISTÓRICOS DE EXUMAÇÕES DE GEOSSINTÉTICOS DE CAMPO

Tabela A1 - Durabilidade de geotêxteis por exumação de campo.

Aterro de solo reforçado (Troost <i>et al.</i>, 1994)	
Período	13 anos [1980 a 1993]
Local da obra	Arnhem, Países Baixos
Geossintético	Geotêxtil tecido de filamentos de poliéster (longitudinal) e poliamida (transversal) de resistência característica de 200 kNm/45 kN/m
Características construtivas	Aplicação de geomanta e hidrossemeadura, porém com verificação de falha na ancoragem de geomanta no lado Sul do aterro
Principais considerações	• Perda de resistência de 3-6% na parte interna do aterro reforçado, atribuído a danos de instalação; • Perda de resistência de até 12% nas seções com hidrossemeadura, atribuído a danos de instalação e pequena parcela por radiação UV; • Perda de resistência próximo a 50% com falha na ancoragem da geomanta.
Proteção costeira (Loke <i>et al.</i>, 1994)	
Período	5 anos [1986 – 1992]
Local da obra	Costa oeste da Malásia
Geossintético	Geotêxteis não tecido agulhados
Características construtivas	Uso de geotêxtil não tecido agulhado como filtro sobrepostos por camadas de rochas exumados de duas regiões costeiras
Principais considerações	• Ausência de danos de instalação observados na exumação; • Abertura de filtração não foi significativamente influenciado e manutenção dos critérios de permeabilidade e de retenção de partículas sólidas; • Baixas reduções de resistências à tração (9% e 4%). Apenas em uma região observou-se redução de resistência à perfuração em 40%, o qual é um dos principais requisitos para garantir a sobrevivência dos geotêxteis.
Muro de solo reforçado e proteção costeira (Sprague; Goodrum; Kuck, 1994)	
Período	11 anos [1982 – 1993] e 20 anos [1973 – 1993]
Local da obra	Colorado, Estados Unidos (11 anos) e Augsburg, Alemanha (20 anos)
Geossintético	Geotêxteis de poliéster (PET)
Características construtivas	Aterro de solo reforçado com geotêxtil (11 anos) e área de proteção costeira (20 anos), ambos com uso de geotêxtil de poliéster
Principais considerações	• Não ocorreram perdas de resistências e de propriedades microestruturais significativas nos períodos analisados; • Danos de construção foram responsáveis por quase toda a redução mecânica observada (34% e 40%). Para análise de 20 anos, apenas 10% de redução da resistência (40%) foi atribuída à degradação após instalação.
Trincheira drenante em taludes (Veylon <i>et al.</i>, 2016)	
Período	18 anos [1993 a 2011]
Local da obra	Trièves, Alpes Franceses
Geossintético	Geotêxtil não tecido de polietileno (PE) e geotêxtil tecido de polipropileno (PP)
Características construtivas	Trincheiras drenantes com 12 m de comprimento e profundidades até 2,50 m com uso de dois geotêxteis e material granular de alta permeabilidade
Principais considerações	• Ocorrências de obstrução de filtro e entupimentos interno e químico (deposição de calcita) à jusante, este como o mecanismo preponderante na redução de desempenho dos filtros geotêxteis para usos em trincheiras; • Resistências à tração dos geotêxteis exumados não apresentaram alterações significativas em relação aos parâmetros intactos.

Fonte: a autora.

Tabela A2 - Durabilidade de produtos correlatos aos geotêxteis por exumação de campo.

Muro de solo reforçado (Naughton <i>et al.</i>, 2016)	
Período	22 anos [1987 – 2009] e 37 anos [1977 – 2014]
Local da obra	Elmadag, Turquia (22 anos) e Berkshire, Reino Unido (37 anos)
Geossintéticos	Filamentos de poliéster
Características construtivas	Muro de 6 metros de altura com diferentes elementos de reforço para estudos de longo prazo (37 anos) e faceamento com placas de concreto. Muro de 7 metros de altura com exumação após terremoto na região (22 anos)
Principais considerações	• Elementos de reforço não apresentaram redução na resistência, alterações de microscopia e de parâmetros químicos.
Muros de solos reforçados (Leshchinsky <i>et al.</i>, 2020)	
Período	36 anos [1983 a 2019]
Local da obra	Oregon, Estados Unidos
Geossintético	Geogrelha uniaxial de polietileno de alta densidade (PEAD)
Características construtivas	Muro de solo reforçado de comprimento entre 21 a 50 metros e altura entre 5 a 9 metros com extração de amostras nas faces de envelopamento em 1 ponto com exposição ao intemperismo (sem vegetação) e 3 condições não expostas (cobertas por hidrossemeadura). Vida útil de projeto de 75 anos
Principais considerações	• Não foram observados danos visuais significativos; • Não ocorreram alterações significativas nas propriedades mecânicas e química da geogrelha; • Amostras exumadas em locais sem e com exposição ao intemperismo foram avaliadas por fluência à tração para cargas aproximadas de 28,5%, 37% e 47%: rompimentos observados em ambas as situações para carga de 47% de 800 hs (com exposição) e 1500 hs (sem exposição). Todavia, a resistência à fluência especificada para a geogrelha é de 37% (29,2 kN/m), ou seja, a ruptura por fluência era esperada mesmo para a condição não exposta.

Fonte: a autora.

Tabela A3 - Durabilidade de barreiras geossintéticas poliméricas por exumação de campo.

Aterro sanitário de resíduos sólidos (Rafter; Youngblood; Koerner, 2018)	
Período	22 anos [1994 – 2016]
Local da obra	Nova Jersey, Estados Unidos
Geossintético	Geomembrana de polietileno de alta densidade
Características construtivas	Aterro sanitário de resíduos sólidos com aplicação de geomembrana de polietileno de alta densidade
Principais considerações	• Não ocorreram alterações significativas nas propriedades físicas, químicas e mecânicas da geomembrana.
Bacia de sedimentação de mina (Newman; Stark, 2009)	
Período	10 anos [1995 – 2005]
Local da obra	Minnesota, Estados Unidos
Geossintético	Geomembranas de policloreto de vinila (PVC)
Características construtivas	Instalação das geomembranas para estudo de durabilidade por 30 anos
Principais considerações	• Baixas alterações nas propriedades pelo ambiente de exposição; • Não foram observadas nenhuma tendência clara nas propriedades medidas em relação ao tempo de exposição.

Fonte: a autora.

Tabela A4 - Durabilidade de geocompostos por exumação de campo.

Aterro sanitário de resíduos sólidos (Benson; Kucukkirca; Scalia, 2010)	
Período	5,8 anos [2001 – 2007]
Local da obra	Wisconsin, Estados Unidos
Geossintético	Geomembrana, forro geossintético argiloso e geocomposto drenante
Características construtivas	Geomembrana sobrejacente ao forro geossintético argiloso. Geocomposto drenante instalado acima da geomembrana
Principais considerações	• Geocomposto: diminuição da permissividade e transmissividade superior a indicação do fabricante. Geotêxtil atendeu ao critério de filtração; • Geomembrana: diminuição na resistência por um fator de 1,2, porém o tempo de indução de oxidação foi superior a indicação do fabricante; - Forro geossintético argiloso: força de interface com a geomembrana permaneceu inalterada e sem alterações na condutividade hidráulica.
Recuperação de barragem de concreto e alvenaria (Cazzuffi; Gioffrè, 2020)	
Período	25 anos
Local da obra	Alpes Italianos
Geossintético	Geocomposto formado por geomembranas de policloreto de vinila (PVC) e geotêxtil não tecido agulhado de poliéster (PET)
Características construtivas	Cinco barragens de concreto e uma alvenaria com instalação de geocomposto à montante e com a face de geomembrana exposta às intempéries
Principais considerações	• Perda de plastificante inferior a 30% e linear ao longo do tempo, sem afetar a funcionalidade das geomembranas; • Aumento da rigidez das geomembranas.

Fonte: a autora.

REFERÊNCIAS

- BENSON, C.H.; KUCUKKIRCA, I.E.; SCALIA, J. Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, p. 536–546, 2010.
- CAZZUFFI, D.; GIOFFRÈ, D. Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, 130-136, 2020.
- LESHCHINSKY, B.; BERG, R.; LIEW, W.; KAWAKAMI-SELIN, M.; MOORE, J.; BROWN, S.; KLEUTSCH, B.; GLOVER-CUTTER, K.; WAYNE, M. Characterization of geogrid mechanical and chemical properties from a thirty-six year old mechanically-stabilized earth wall. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, p. 793–801, 2020.
- LOKE, K.H.; LEE, C.H.; LIM, C.H.; CHIN, P.W. Performance of nonwoven geotextile in coastal protection works in marine clays. *In*: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 1994, Singapore. **Anais [...]**. Singapore, 1994.
- NAUGHTON, P.J.; OZÇELIK, H.; SCOTTO, M.; BALDERSON, T. The long term performance of polymeric reinforced walls under static and seismic conditions. *In*: SIXTH EUROPEAN CONFERENCE ON GEOSYNTHETIC, 2016, Slovenia. **Anais [...]**. Slovenia, 2016.
- NEWMAN, E.J.; STARK, T.D. Ten-year PVC geomembrane durability. **Geosynthetics International**, v. 16, n. 2, p. 97–108, 2009.
- RAFTER, T.; YOUNGBLOOD, J.; KOERNER, G. Case history of a 22-year old geomembrane liner at a domestic waste landfill. *In*: 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 2018, Seoul, Korea. **Anais [...]**. Seoul, Korea, 2018.
- SPRAGUE, C.J.; GOODRUM, R.A.; KUCK, P.J. Durability assessment of exhumed polyester geotextiles. *In*: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 1994, Singapore. **Anais [...]**. Singapore, 1994.
- TROOST, G.H.; DEN HOEDT, G.; RISSEEUW, P.; VOSKAMP, W.; SCHMIDT, H.M. Durability of a 13-year old test embankment reinforced with polyester woven fabric. *In*: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS, 1994, Singapore. **Anais [...]**. Singapore, 1994.

VEYLON, G.; STOLTZ, G.; MÉRIAUX, P.; FAURE, Y.H.; TOUZE-FOLTZ, N. Performance of geotextile filters after 18 years' service in drainage trenches. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, p. 515–533, 2016.

APÊNDICE B – APLICABILIDADE DE GEOTÊXTEIS EM OBRAS COSTEIRAS E TUBOS GEOTÊXTEIS PARA DESAGUAMENTO E CONFINAMENTO DE RESÍDUOS

B.1. GEOTÊXTEIS EM OBRAS COSTEIRAS

A aplicação de geotêxteis em obras costeiras para mitigação de processos erosivos, como proteção de margens e quebra-mar, trata-se de bolsas ou tubos preenchidos com materiais granulares e depositados uns sobre os outros para conformar estruturas de proteção costeiras não rígidos, comumente de longo prazo, em substituição a composições feitas com maciços rochosos (Corbella; Stretch, 2012; Saathoff; Oumeraci; Restall, 2007). A Figura B1 exemplifica algumas destas aplicações, cujo início da engenharia com geossintéticos compreendeu tais tipologias de obras costeiras na década de 50 na Holanda, Estados Unidos e Alemanha (Shukla; Yin, 2006). No Brasil, primeira aplicação em campo ocorreu com tubos geotêxteis preenchidos com areia para a contenção de aterro hidráulico em São Luiz (MA) em 1981 (Vertematti, 2015).

De acordo com Oberhagemann e Hossain (2011), obras emergenciais costeiras em Bangladesh têm sido feitas desde o final da década de 90 com uso da técnica supracitada devido os embargos legais de acesso aos materiais rochosos para tais obras, bem como maiores custos e períodos de obras por alternativas em concreto. Com as experiências adquiridas em período de oito anos, permitiram a estruturação de, por exemplo, 12km de proteção costeira em sistemas de geotêxteis preenchidas com material granular (Figura B2).

Outra aplicabilidade de obra costeira é a conformação de tubos de geotêxteis preenchidos com material granular para a construção de ilhas artificiais, cujas contextualizações supramencionadas de obras costeiras são também aplicáveis. A Figura B3 exemplifica a estruturação de plataforma de trabalho temporária para a construção de uma ponte (fundação e superestrutura) sobre um rio como meio de interligação entre duas cidades de importância econômica na Coreia do Sul. Considerada uma aplicação pioneira neste local, a referida obra consistiu em alternativa ao uso de barcaças, diques de rochas, estacas-pranchas, dentre outros, em termos de tempo de execução, custos e impactos ambientais. Mesmo de uso temporária, com duração de obra em torno de quatro anos, os autores reportaram a preocupação quanto a fotodegradação do material geotêxtil como critérios de projeto (Lawson, 2008; Yee; Choi, 2008).

Figura B1 - Aplicações de geotêxteis em obras costeiras emergenciais.



(a) Proteção de margens para mitigar danos a construção existente na Austrália.



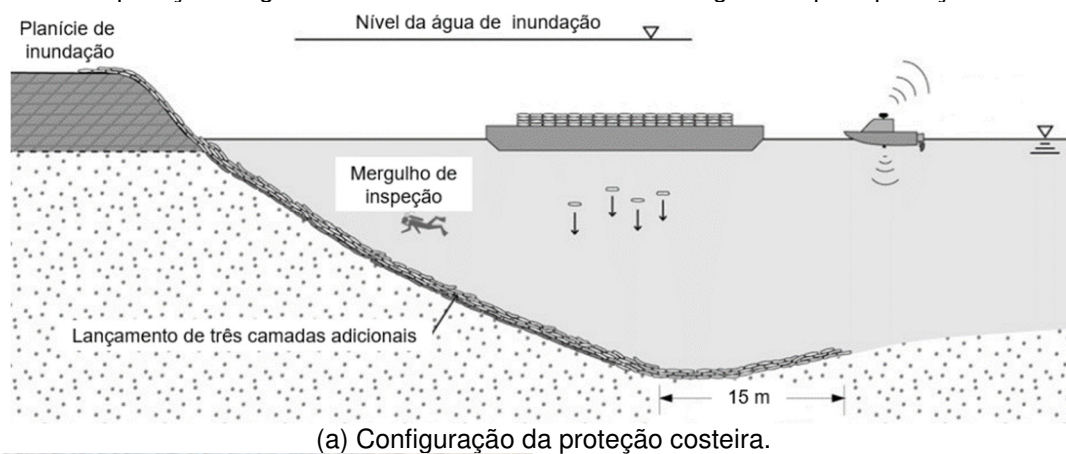
(b) Quebra-mar para impedir processos erosivos executado na Austrália.



(c) Proteção de margens executado acima de um paredão de rochas na África do Sul.

Fonte: (a) Saathoff; Oumeraci; Restall, 2007; (b) Saathoff; Oumeraci; Restall, 2007; (c) Corbella; Stretch, 2012.

Figura B2 - Aplicação de geotêxteis em obras costeiras em Bangladesh para proteção de margens.



(a) Configuração da proteção costeira.



(b) Posicionamento de sistemas de geotêxteis para lançamento.



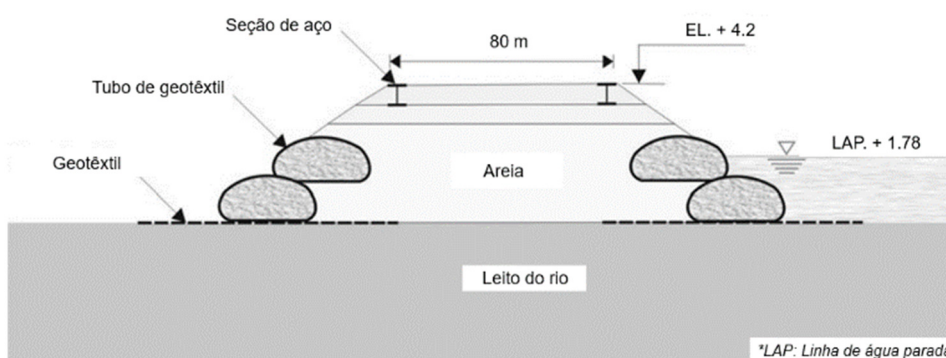
(c) Lançamento de sistemas de geotêxtil na camada submersa.

Fonte: Oberhagemann; Hossain, 2011. Adaptada pela autora.

Figura B3 - Sistemas de geotêxteis empregados na estruturação de ilha artificial na Coréia do Sul.

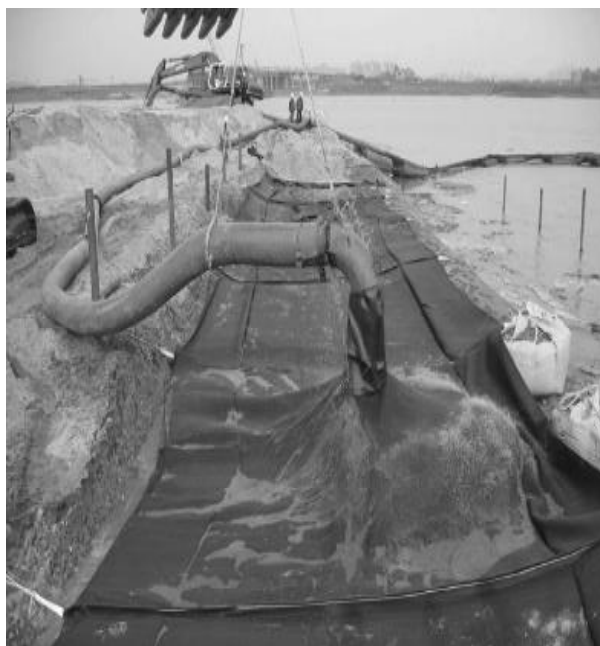


(a) Vista aérea da ilha artificial.



(b) Seção da ilha temporária.

Figura B3 - Sistemas de geotêxteis empregados na estruturação de ilha artificial na Coreia do Sul (continuação).



(c) Bombeamento do material de enchimento dos tubos.



(d) Vista lateral dos tubos geotêxteis utilizados na ilha artificial.

Fonte: (a) Lawson, 2008; (b) Yee; Choi, 2008. Adaptada pela autora; (c) Yee; Choi, 2008; (d) Yee; Choi, 2008.

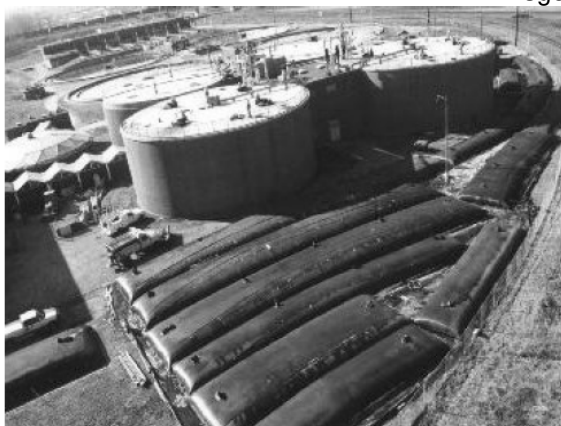
B.2. TUBOS GEOTÊXTEIS PARA DESAGUAMENTO E CONFINAMENTO DE RESÍDUOS

Reporta-se o uso de geotêxteis em aplicações de desaguamento e confinamento de resíduos líquidos ou semi-sólidos, coesos, com alto teor de líquido em comparação a porção sólida e alta resistência à filtração, produzidos em diversos processos industriais. As primeiras aplicações de tubos geotêxteis destinaram a resíduos gerados em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), que datam da década de 1990 nos Estados Unidos (Fowler *et al.*, 2002; Lawson, 2008), bem como em Estações de Tratamento de Água (ETA).

A referida tecnologia tem se mostrado uma alternativa sustentável para a redução e confinamento de grandes volumes de resíduos rotineiramente gerados em processos industriais e sua disposição final adequada. Em comparação às técnicas tradicionais (naturais e mecânicas), apresenta fácil execução, baixos custo e impacto ambiental, além da necessidade de áreas menores para os processos de desaguamento e consolidação, independência da dinâmica climática e eletricidade, dentre outras (Cantré; Saathoff, 2011; Guimarães; Urashima; Vidal, 2014; Satyamurthy; Bhatia, 2009; Wilke *et al.*, 2015).

A Figura B4a aborda a aplicação de tubos geotêxteis para desaguamento de lodos gerados em ETE. Na Figura B4b, exemplifica-se o seu uso na cidade de Rio das Ostras (RJ), iniciada em 2007, destinada ao desaguamento de lodos coletados em fossas sépticas por caminhões à vácuo, bem como de lixiviados de aterros sanitários. A aplicação consistiu na necessidade de remediação de saneamento e infraestrutura urbana devido ao grande crescimento demográfico neste local (Castro; Melo; Escobar, 2008). A Figura B4c trata de uma aplicação pioneira na Colômbia em 2011, que compreendeu esvaziamentos das lagoas de oxidação do Aeroporto Internacional El Dorado, Bogotá, pois foi atingida a capacidade de operacionalização e eminente expansão de toda a sua infraestrutura (Ruiz; Rendón, 2012).

Figura B4 - Aplicações de sistema de confinamento para resíduos de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).



(a) Desaguamento de lodo de ETE nos Estados Unidos.



(b) Desaguamento de lodos de fossas sépticas e lixiviados de aterro sanitário na cidade de Rio das Ostras, RJ.



(c) Desaguamento de lodos de lagoas de oxidação em Bogotá, Colômbia.

Fonte: (a) Fowler *et al.*, 2002; (b) Castro; Melo; Escobar, 2008; (c) Ruiz; Rendón, 2012.

A Figura B5a apresenta a aplicação de tubos geotêxteis para o desaguamento de lodos gerados em uma ETA em canteiro das obras para a construção da Hidrelétrica de Jirau e Santo Antônio, localizadas no Rio Madeira e próximas a cidade de Porto Velho (RO). A ETA foi construída como parte da infraestrutura deste canteiro que atendeu 15.000 funcionários. Outro exemplo Figura B5b foi o emprego destes tubos

como tratamento auxiliar aos lodos depositados na unidade floculadora da ETA localizada em Piquete (SP), de modo a aumentar a capacidade de tratamento de água (Guanaes; Sampaio, 2012).

Figura B5 - Aplicações de sistema de confinamento para resíduos de Estação de Tratamento de Água (ETA).



(a) Desaguamento de lodo de ETA da hidrelétrica no Rio Madeira, Porto Velho, RO.

(b) Desaguamento de lodo de ETA em Piquete, SP.

Fonte: Guanaes; Sampaio, 2012.

A técnica de desaguamento e confinamento de lamas de mineração em tubos geotêxteis tem sido considerada uma das alternativas sustentáveis e promissoras neste setor em detrimento dos representativos volumes de resíduos gerados em beneficiamentos de minérios, os quais são comumente armazenados em estruturas de barragens. A referida tecnologia viabiliza o aumento no teor de sólidos, que inicialmente pode corresponder a apenas 0,5%, e aumentar a sua resistência, recuperação de metais preciosos e contenção de contaminantes (Kiffle; Bhatia; Lebster, 2023).

Os tubos de geotêxteis atuam como estruturas complementares no processo de disposição de resíduos pelo seu desaguamento e confinamento por encapsulamento, sejam em camadas simples ou empilhados, cuja vantagem é o aumento da capacidade de armazenamento e expansão da vida útil destas instalações em espaços limitados, dentre outros. Os processos de empilhamento devem ser projetados para se evitar quaisquer falhas de estabilidades ou rupturas (Almeida *et al.*, 2020; Assinder *et al.*, 2016; Kiffle; Bhatia; Lebster, 2023).

As vantagens supramencionadas comparam-se às técnicas de desidratação por dispositivos mecânicos, como prensas de filtro de correias e de câmaras, ou por centrífugas, que requerem grandes demandas por energia e são limitadas pelo pequeno volume que pode ser processado (Wilke *et al.*, 2015).

Berg e Oliveira (2019) relatam que o uso de tubos geotêxteis foi uma das medidas de remediação mais rápidas empregada após o desastre ambiental causado pelo rompimento da barragem de mineração em Mariana (MG), distrito de Bento Rodrigues, em novembro de 2015 (Figura B6). Vale ressaltar que pesquisadores brasileiros têm realizado experimentos laboratoriais para a aplicabilidade de tubos geotêxteis como técnica de desaguamento e confinamento de lamas de mineração (por exemplo, Barbosa, 2011; Bittar *et al.*, 2010; Castro *et al.*, 2009; Ferreira, 2011; Gomes, 2007; Martins, 2006; Peixoto, 2012).

Figura B6 - Desaguamento de lamas de mineração após rompimento de barragem em Mariana (MG).



Fonte: Berg; Oliveira, 2019. Adaptada pela autora.

A Figura B7a exemplifica o uso de tubos geotêxteis em uma mineradora de ouro do Canadá (Mina de Tundra) como parte do projeto iniciado em 2011 que visou limpar e remediar minas abandonadas, cuja operação se deu entre 1964 a 1980. Esta aplicação consistiu no desaguamento da fração líquida dos lagos da mineradora que apresentava níveis significativos de metais oriundos do galgamento de resíduos tratados e de intemperismo do leito rochoso mineralizado e estéril. Ao final, foram desaguados 11.000 m³ de resíduos em dois terrenos, cada um com dois tubos geotêxteis de 14 metros de circunferência e 61 metros de comprimento. Na Figura B7b, tem-se o emprego de tubos geotêxteis em uma mineradora de ouro desativada no Alasca (região conhecida como Triângulo Dourado do Alasca) para a remediação de águas residuais coletadas da mina e dispostas em uma bacia de decantação e, assim, cumprir os regulamentos de descartes de resíduos de modo ambientalmente compatível. Foram empregados dois tubos geotêxteis de 20 metros de circunferência

e 22 metros de comprimento em condições de projeto piloto que permitiu o retorno da água desaguada para a bacia de decantação (Kiffle; Bhatia; Lebster, 2023).

Figura B7 - Desaguamento por tubos geotêxteis de águas residuais contaminadas de mineradoras.



(a.1) Preparação do sistema de desaguamento



(a.2) Tubos geotêxteis preenchidos

(a) Mineradora de ouro abandonada no Canadá.



(b.1) Bacia de decantação das águas residuais da mina



(b.2) Dois tubos geotêxteis usados no estudo piloto em escala real

(b) Mineradora de ouro desativada no Alasca.

Fonte: Kiffle; Bhatia; Lebster, 2023. Adaptada pela autora.

A Figura B8 apresenta a aplicação de tubos geotêxteis em uma mineradora de níquel e zinco da Finlândia (Mina Talvivaara), que produziu grandes volumes de pasta de gesso como subproduto do processo de mineração. Este projeto foi implantado como solução de remediação após a ocorrência de um vazamento nas lagoas de gesso em novembro de 2012. O gesso restante dessas lagoas e o gesso produzido na planta de processamento foram bombeados para a mina à céu aberto. Após o sucesso da remediação inicial, a técnica de tubos geotêxteis foi implantada como solução de armazenamento de resíduos de gesso nos anos subsequentes. O projeto contemplou o empilhamento dos tubos em cinco camadas. Na Figura B8a visualiza-se apenas a quinta camada de tubos geotêxteis que foi posicionada durante o inverno e, assim, as demais outras cobertas com neve e gelo. Na Figura B8b é possível

visualizar as demais camadas na área de desaguamento com a conclusão do processo (Wilke *et al.*, 2015).

Figura B8 - Implantação de tubos geotêxteis em mineradora de níquel e zinco na Finlândia.



(a) Visualização da quinta camada de tubos geotêxteis sobre as demais cobertas durante o inverno



(b) Camadas de tubos geotêxteis após o desaguamento final

Fonte: Wilke *et al.*, 2015.

Outra aplicação piloto reportada na literatura foi em uma mineradora de ouro e demais metais na Grécia (Complexo de Minas Stratoni) que empregou tubos geotêxteis em estudo piloto entre 2001 e 2002 para o desaguamento em grande escala de lamas com resíduos finos e águas da mina (Figura B9). A escolha pela técnica deu-se por critérios técnicos, econômicos e ambientais, ao compará-lo aos depósitos das lamas e águas de minas em lagoas, que necessitariam de maiores espaços não disponíveis e de expressivas obras de terraplanagem para a manutenção do fator de segurança de uma instalação expandida, bem como de significativos custos por implantação de desaguamentos mecânicos por filtração. A aplicação piloto empregou um tubo geotêxtil de 14,7 metros de circunferência e 60 metros de comprimento com a realização de ciclos de bombeamentos de lamas em períodos diurnos ao longo do tempo para atingir a altura de consolidação final de 2,50 metros.

Ao final, obtiverem uma concentração de sólidos de 65%, cujo valor inicial era de 7% e, deste sucesso, a posterior implantação em escala real (Newman; Hodgson; Rosselot, 2004).

Figura B9 - Aplicação de tubos geotêxteis para desaguamento de resíduos de mineração na Grécia.



(a) Vista geral do tubo geotêxtil instalado.



(b) Processo de desaguamento



(c) Detalhe da limpeza do filtrado

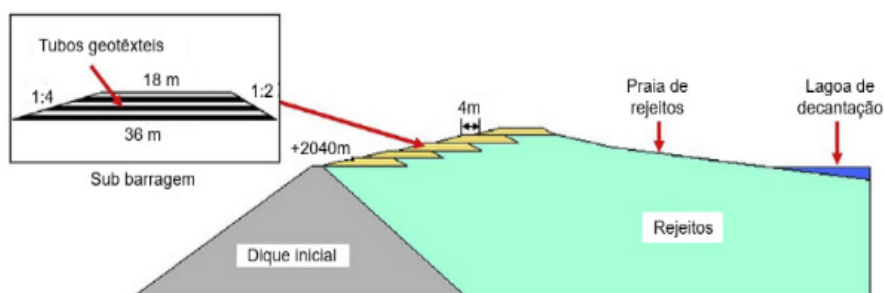
Fonte: Newman; Hodgson; Rosselot, 2004.

Mais uma relevante aplicação de tubos geotêxteis em escala real remete-se a uma mineradora de fosfato na China (Mineradora Anning), cuja atividade iniciou-se em 2007 e, ao final de 2016, foi necessária a terceira ampliação da capacidade de comissionamento das lamas em barragem construída por alteamento à montante (Figura B10). Este exemplo singular remete-se ao uso de tubos geotêxteis na construção de uma barragem para o descarte de lamas. A altura total da barragem atingiu 61 metros em 2016, formado por 9 metros de tubos escalonados, e o aumento da capacidade de armazenamento de 1,10 milhões de metros cúbicos. As dimensões de cada tubo geotêxtil foram de (18-36) metros de comprimento, 5 metros de largura $\times$ (0,4-0,6) metros de espessura (ou altura final). Os ciclos de bombeamento ocorreram em intervalos de uma hora durante 15 dias, até a consolidação final (Yang *et al.*, 2019).

Figura B10 - Aplicação de tubos geotêxteis no desaguamento e estruturação de barragem de resíduos finos em mineradora Chinesa.



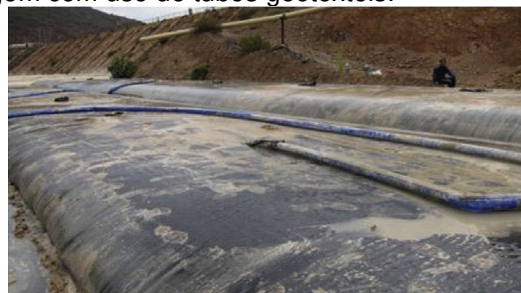
(a) Visão geral da barragem de resíduos.



(b) Ilustração do projeto da barragem com uso de tubos geotêxteis.



(c) Polpação



(d) Rejuntamento



(e) Desaguamento



(f) Moldagem

Fonte: Yang *et al.*, 2019. Adaptada pela autora.

Por fim, para a aplicação de tubos geotêxteis em sedimentos e fluidos contaminados, Yee *et al.* (2012) apresentaram o uso de tubos geotêxteis para o desaguamento de aproximadamente 5 milhões de metros cúbicos de águas

domésticas e de efluentes industriais contaminados na China. O projeto contemplou estudos preliminares e posterior montagem de infraestrutura de larga escala, em torno de 120.000 m², para o empilhamento de 298 tubos geotêxteis em três camadas, que apresentaram circunferência de 27,5 a 30,5 metros e comprimento de 13 a 79 metros. A fração filtrada foi devolvida ao curso hídrico e a porção sólida desidratada foi empregada no próprio local do projeto ou destinados a aterros sanitários, em função de seu grau de contaminação (Figura B11).

Figura B11 - Tubos geotêxteis para desaguoamento e confinamento de águas domésticas e efluentes industriais na China.



(a) Primeiras duas camadas de tubos geotêxteis



(b) Visão geral da área de disposição dos tubos geotêxteis
Fonte: Yee *et al.*, 2012.

A Figura B12 aborda a dragagem ambiental de insumos industriais contaminados com metais, polímeros e sólidos em suspensão nos Estados Unidos para posterior destinação a aterros licenciados. O referido projeto visou também proporcionar resistência ao cisalhamento confinado em uma estrutura estável e resistente aos processos erosivos (Mastin; Lebster; Sally, 2008).

A Figura B13 reporta uma aplicação brasileira para o desaguoamento de lodos e sedimentos contaminados gerados em Bacia de Equalização (BEQ) da empresa Centrel, localizada no Complexo Petroquímico do Nordeste na cidade de Camaçari, Bahia (Melo *et al.*, 2012).

Figura B12 - Emprego de tubos geotêxteis para desaguamento e confinamento de sedimentos industriais contaminados nos Estados Unidos.



(a) Procedimento de dragagem de resíduos industriais contaminados

(b) Desaguamento dos resíduos contaminados em tubos geotêxtil.

Fonte: Mastin; Lebster; Sally, 2008.

Figura B13 - Emprego de tubos geotêxteis para o desaguamento de lodos e sedimentos industriais na cidade de Camaçari (BA).



(a) Vista geral da BEQ

(b) Tubo de geotêxtil em desaguamento.

Fonte: Melo *et al.*, 2012.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M.S.S.; EHRLICH, M.; GARDONI, M.G.A.; PALMEIRA, E.M.; VIDAL, D.M.; VILAR, O.M. Brazilian contributions to geosynthetic engineering. In: 4TH PAN AMERICAN CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, 2020, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Online: IGS Brasil, 2020. 121 p.

ASSINDER, P.J.; BREYTENBACH, M.; WIEMERS, J.; HORTKORN, F. Utilizing geotextile tubes to extend the life of a Tailings Storage Facility. In: FIRST SOUTH AFRICAN GEOTECHNICAL CONFERENCE, 2016, Sun City, South Africa. **Anais [...]**. Geotechnical Division of the South African Institution of Civil Engineering (SAICE), May 5-6, 2016.

BARBOSA, J.A. **Análise laboratorial da eficiência de sistemas fechados de geotêxteis no desaguamento de lama de rocha fosfática**. 2011. 115 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BERG, G.V.D.; OLIVEIRA, F.A.P. Adequacy of geotextile tube dewatering in three river remediation scenarios. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 234, p. 155-165, 2019.

BITTAR, R.J.; GOMES, R.C.; MELO, L.C.Q.C.; MARTINS, P.M. Feasibility studies for phosphate fine tailing disposal in geotêxtil tubes. In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS, GEOSYNTHETICS FOR A CHALLENGING WORLD, 2010, Guarujá. **Anais**, v. 3., pp. 1111-1114. Guarujá, 2010.

CANTRÉ, S.; SAATHOFF, F. Design parameters for geosynthetic dewatering tubes derived from pressure filtration tests. **Geosynthetics International**, v. 18, n. 3, p. 90-103, 2011.

CASTRO, N.P.B.; MELO, L.C.Q.C.; ESCOBAR, L.G.B. Environmental integrated solution for septic tank sludge and landfill leachate using geotextile tubes dewatering technology. In: THE FIRST PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION, 2008, Cancun. **Anais** [...]. Cancun, 2008.

CASTRO, N.P.B.; MARTINS, P.M.; STEPHENS, T.; MELO, L.C.Q.C. Tests to Evaluate Dewatering and Filtration Efficiency for Geotextile Tubes Design. In: GEOSYNTHETICS 2009, 2009, Salt Lake City, Utah, 9 pp. **Anais** [...]. Salt Lake City, 2009.

CORBELLA, S.; STRETCH, D.D. Geotextile sand filled containers as coastal defence: South African experience. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 35, p. 120-130, 2012.

FERREIRA, L.D. **Desenvolvimento de equipamento de laboratório para o estudo de fenômenos eletrocinéticos no processo de adensamento de resíduos de mineração**. 2011. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FOWLER, J.; DUKE, M.; SCHMIDT, M.L.; CRABTREE, B. BAGBBY, R.M.; ETRAINER, E. Dewatering sewage sludge and hazardous sludge with geotextile tubes. In: 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS (7ICG), 2002, Nice. **Anais** [...]. Nice, 2002.

GOMES, R.C. Sistemas de disposição de rejeitos de mineração utilizando geotubos como estruturas de desaguamento e/ou de contenção. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS/REGEO, 2007, Recife. **Anais** [...]. Recife, 2007.

GUANAES, E.A.; SAMPAIO, D.V. Recent applications of geotextile tubes for sludge and slurry dewatering – Brazil. In: SECOND PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION (GEOAMERICAS 2012), 2012, Lima. **Anais** [...]. Lima, 2012.

GUIMARAES, M.G.A.; URASHIMA, D.C.; VIDAL, D.M. Dewatering of sludge from a water treatment plant in geotextile closed systems. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 5, p. 310-320, 2014.

KIFFLE, Z.B.; BHATIA, S.K.; LEBSTER, G.E. Dewatering of mine tailing slurries using geotextile tube: case histories. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, 10p, 2023.

LAWSON, C.R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. **Geosynthetics International**, v. 15, p. 384-427, 2008.

MARTINS, P.M. **Utilização de Tubos Geotêxteis para Desaguamento de Rejeitos de Mineração**. 2006. Dissertação de Mestrado, Departamento de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 161 p.

MASTIN, B.J.; LEBSTER, G.E.; SALLEY, J.R. Use of geotextile tube dewatering containers in environmental dredging. In: THE FIRST PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION, 2008, Cancun. **Anais** [...]. Cancun, 2008.

MELO, L.C.Q.C.; FUTAI, M.M.; STEPHENS, T.C.; CASTRO, N.P.B. Containment and dewatering of hazardous material using woven geotextile tubes. In: SECOND PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION (GEOAMERICAS 2012), 2012, Lima. **Anais** [...]. Lima, 2012.

NEWMAN, P.; HODGSON, M.; ROSSELOT, E. The disposal of tailings and minewater sludge using geotextile dewatering techniques. **Minerals Engineering**, v. 17, p. 115-121, 2004.

OBERHAGEMANN, K.; HOSSAIN, M.M. Geotextile bag revetments for large rivers in Bangladesh. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, p. 402-414, 2011.

PEIXOTO, C.L.P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, 93 p.

RUIZ, N.R.; RENDÓN, M. Tubos de geotêxtil en aplicaciones de confinamiento y deshidratación de lodos en el Aeropuerto Internacional Eldorado. *In: SECOND PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION (GEOAMERICAS 2012)*, 2012, Lima. **Anais [...]**. Lima, 2012.

SAATHOFF, F.; OUMERACI, H.; RESTALL, S. Australian and German experiences on the use of geotextile containers. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, p. 251-263, 2007.

SATYAMURTHY, R.; BHATIA, S.K. **Experimental Evaluation of Geotextile Dewatering Performance: Geosynthetics & GRI-22 Conference**. *In: INDUSTRIAL FABRICS ASSOCIATION INTERNATIONAL*, pp. 464-473, 2009.

SHUKLA, S.K.; YIN, J.H. **Fundamentals of Geosynthetic Engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2006. 428 p.

VERTEMATTI, J.C. (coordenador). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2ª ed. São Paulo: Blücher, 2015, 576p.

WILKE, M.; BREYTENBACH, M.; REUNANEN, J.; HILLA, V.M. Efficient and environmentally sustainable tailings treatment and storage by geosynthetic dewatering tubes: working principles and Talvivaara case study. *In: PROCEEDINGS TAILINGS AND MINE WASTE*, 2005, Vancouver. **Anais [...]**. Vancouver, 2005.

YANG, Y.; WEI, Z.; CAO, G.; YANG, Y.; WANG, H.; ZHUANG, S. A case study on utilizing geotextile tubes for tailings dams construction in China. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, p. 187-192, 2019.

YEE, T.W.; CHOI, J.C. Geotextile tube application for Islan Grand Bridge Project, Korea. *In: THE FIRST PAN AMERICAN GEOSYNTHETICS CONFERENCE & EXHIBITION*, 2008, Cancun. **Anais [...]**. Cancun, 2008.

YEE, T.W.; LAWSON, C.R.; WANG, Z.Y.; DING, L.; LIU, Y. Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Eco-City, China. **Geotextile and Geomembranes**, v. 31, p. 39-50, 2012.

APÊNDICE C – COMPLEMENTAÇÃO SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS E FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

C.1. MODELOS DETERMINÍSTICOS

- **Modelo de Arrhenius**

O modelo determinístico de Arrhenius é utilizado em situações nas quais a degradação do material é causada pela temperatura, por exemplo, em materiais dielétricos, semi-condutores, células de bateria, plásticos, dentre outros (Yeoh; Koronios; Gao, 2009). Este é baseado na Lei de Arrhenius (ASTM G 172, 2019; Freitas; Colosimo, 1997; Nelson, 1990), apresentado na Equação C.1, que geralmente regula a cinética de transformações físicas e reações químicas dependentes da temperatura (Segrestin; Jailloux, 1988).

$$\text{Taxa} = A' e^{\left(\frac{-\Delta H}{kT}\right)} \quad (\text{C.1})$$

Dado que,

A' = constante característica do mecanismo de falha do material e das condições impostas ao ensaio acelerado;

ΔH (ou E) = energia de ativação (elétron-volts, eV, ou J/mol);

k = constante de Boltzmann ($8,6171 \times 10^{-5}$ eV/K);

T = temperatura absoluta Kelvin ($273,16 + ^\circ\text{C}$).

Como exemplo de energia de ativação, Nitta e Maeda (2010) realizaram pesquisas laboratoriais com quatro tipos de matrizes poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) a tensões de fluência à tração em distintas temperaturas, os quais obtiveram valores de energia de ativação de 180-184 kJ/mol. Este modelo é comumente empregado em termos de tempo até a falha ao invés de taxa de falha. A Equação C.2 pode ser reescrita pela Equação C.3 (Freitas; Colosimo, 1997):

$$\text{Tempo}(t) = A e^{\left(\frac{\Delta H}{kT}\right)} \quad (\text{C.2})$$

Dado que,

A = constante do mecanismo para o tempo de falha.

Ressalta-se que, na Equação C.2, o elemento ‘tempo’ é arbitrário, ou seja, é o tempo decorrido para se obter certo percentual de falha do material em função da temperatura (ASTM G 172, 2019; Maxwell *et al.*, 2005). Nas situações em que se aplicam o tempo na escala logarítmica, obtém-se a linearização da equação, descrito na Equação C.3 (Freitas; Colosimo, 1997):

$$\ln(t) = \ln(A) + \frac{E}{kT} \quad (C.3)$$

Dado que,

A = constante característica do mecanismo de falha do material e das condições impostas ao ensaio acelerado;

E = energia de ativação (elétron-volts, eV, ou J/mol);

k = constante de Boltzmann ($8,6171 \times 10^{-5}$ eV/K);

T = temperatura absoluta Kelvin ($273,16 + ^\circ\text{C}$).

Para aplicações em materiais poliméricos, Brown e Greenwood (2002) tratam que o modelo de Arrhenius é bastante útil para ensaios acelerados por possibilitar que resultados obtidos a temperaturas mais elevadas possam ser ajustados para avaliar a exposição a temperaturas mais baixas ao longo do tempo.

O modelo de Arrhenius pode ser aplicado a geossintéticos, por exemplo, para a obtenção do tempo de falha destes materiais submetidos a ensaios de oxidação com temperatura e pressão de oxigênio elevadas. A seguir, enumeram-se alguns exemplos de estudos publicados na literatura:

- Greenwood e Curson (2012) realizaram ensaios para previsão de vida de geogrelha de polipropileno em três diferentes métodos de ensaio de oxidação acelerada: ensaios de degradação em estufa com circulação de ar, ensaios em autoclave seco e molhado, ambos com oxigênio pressurizado. Foi aplicado como critério de fim de vida da geogrelha o tempo para se obter uma perda de 50% (também denominado de meia-vida) da resistência característica inicial;
- estado da arte da aplicação do modelo de Arrhenius em ensaios de degradação de geossintéticos (Koerner; Lord; Hsuan, 1992);
- estudo de tempo de vida de geotêxteis em degradação química em ambiente ácido e alcalino a temperaturas elevadas (Mathur; Netravali; Rourke, 1994);

- degradação de barreiras geossintéticas poliméricas de polietileno e polipropileno a distintos líquidos com análises de difusão, permeabilidade, calor de sorção e os parâmetros da energia de ativação do modelo Arrhenius (Aminabhavi; Naik, 1998);
- estudo de degradação de filamentos de polipropileno pela redução de aditivos antioxidantes a partir de ensaios com temperatura e pressão de oxigênio, ambas controladas. Neste trabalho, foi aplicado o modelo de Arrhenius para obtenção de um modelo que expressa a velocidade de reação do antioxidante em termos de temperatura e pressão de oxigênio (Li; Hsuan, 2004);
- Muller *et al.* (2008) e Zanzinger e Saathoff (2012) realizaram estudos referente ao tempo de falha de barreiras geossintéticas argilosas em temperaturas elevadas submetidas a solicitações por cisalhamento.

• Modelo de Potência Inversa

O modelo determinístico Potência Inversa tem sido utilizado na modelagem do tempo de falha para distintos fatores de degradação, tais como isolamentos elétricos e dielétricos, vida de projeto de lâmpadas incandescentes, fadiga de metais, dentre outros (Freitas; Colosimo, 1997; Nelson, 1990; Ryan, 2009). A potência inversa apresenta a relação apresentada na Equação C.4 (Freitas; Colosimo, 1997; Nelson, 1990):

$$T = \frac{A}{V^\omega} \quad (C.4)$$

Dado que,

T = tempo de falha (normalmente especificado como um percentual específico da distribuição de vida);

A e ω = parâmetros característicos do material ou produto (fabricação, geometria, etc);

V = fator de estresse.

Também é comum a aplicação do modelo potência inversa em sua forma linearizada, conforme Equação C.5 (Freitas; Colosimo, 1997; Nelson, 1990):

$$\ln(T) = \ln(A) + \omega[-\ln(V)] \quad (C.5)$$

Por último, o modelo de potência inversa também apresenta uma relação de fator de aceleração, conforme Equação C.6 (Freitas; Colosimo, 1997):

$$Ac = \frac{T_0}{T} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^\omega \quad (C.6)$$

Dado que,

Ac = fator de aceleração;

T_0 = tempo de falha para V_0 ;

T = tempo de falha para V ;

V = nível de estresse de interesse;

V_0 = nível de estresse;

ω = parâmetro característico do material.

C.2. PRINCIPAIS LEIS DE FALHA APLICADOS NA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE

• Lei de Falhas Normal

A lei de falhas normal não é a mais importante, porém é o modelo probabilístico apropriado para materiais que apresentam falhas em detrimento de algum efeito de desgaste. Devido ao próprio formato da distribuição normal, esta função de falha (Equação C.7) indica que grande parte dos materiais tende a falhar em torno do tempo médio (Meyer, 2012).

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right]^2\right) \quad (C.7)$$

• Lei de Falhas Exponencial

Conforme apresentado no item 3.2.2.3, a função probabilística exponencial tem como particularidade uma taxa constante de falha, $Z(t) = \alpha$. A função de falhas exponencial (Equação C.8) e sua respectiva função de confiabilidade (Equação C.9) são apresentadas abaixo (Meyer, 2012).

$$f(t) = \alpha e^{-\alpha t}, t > 0 \quad (C.8)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\alpha t} \quad (C.9)$$

- **Lei de Falhas de Weibull**

A partir do modelo de distribuição de Weibull, a taxa de falhas $Z(t)$, em detrimento do tempo de vida de um material (t), é apresentada na Equação C.10, que irá definir se terá um comportamento do tipo crescente ou decrescente em função da escolha adequada do parâmetro β (constante). A função de confiabilidade para a probabilidade de falha $[F(t)]$ por Weibull segue a Equação C.11, que é decrescente (Meyer, 2012):

$$Z(t) = (\alpha\beta)t^{\beta-1} \quad (C.10)$$

Dado que,

α e β = constantes positivas

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\delta} \quad (C.11)$$

Dado que,

α = parâmetro de escala;

t = tempo;

δ = parâmetro de forma.

REFERÊNCIAS

- AMINABHAVI, T.M.; NAIK, H.G. Chemical compatibility testing of geomembranes – sorption/desorption, diffusion, permeation and swelling phenomena. **Geotextile and Geomembranes**, v. 16, p. 333-354, 1998.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G 172**: Standard Guide for Statistical Analysis of Accelerated Service Life Data. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM, 2019.
- BROWN, R.P.; GREENWOOD, J.H. **Practical Guide to the Assessment of the Useful Life of Plastics**. Rapra Technology Limited, 2002.
- FREITAS, M.A.; COLOSIMO, E.A. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, 1997. 309 p.
- GREENWOOD, J.H.; CURSON, A. Life prediction of the oxidation of geogrids by three different methods. **Geotextile and Geomembranes**, v. 34, p. 93-99, 2012.
- KOERNER, R. M.; LORD, A. E.; HSUAN, Y. H. Arrhenius Modeling to Predict Geosynthetic Degradation. **Geotextile and Geomembranes**, v. 11, p. 151-183, 1992.
- LI, M.; HSUAN, Y. G. Temperature and pressure effects on the degradation of polypropylene tape yarns-depletion of antioxidants. **Geotextile and Geomembranes**, v. 22, p. 511-530, 2004.
- MATHUR, A.; NETRAVALI, A.N.; ROURKE, T.D.O'. Chemical Aging Effects on the Physio-Mechanical Properties of Polyester and Polypropylene Geotextiles. **Geotextile and Geomembranes**, v. 13, p. 591-626, 1994.

- MAXWELL, A.S.; BROUGHTON, W.R.; DEAN, G.; SIMS, G.D. **Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials**. National Physical Laboratory: NPL REPORT DEPC MPR 016. Hampton Road, Teddington, Middlesex, 2005.
- MEYER, P.L. **Probabilidade - Aplicações à Estatística**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC; 2012.
- MULLER, W.; JAKOB, I.; SEEGER, S.; TATZKY-GERTH, R. Long-term shear strength of geosynthetic clay liners. **Geotextile and Geomembranes**, v. 26, p. 130-144, 2008.
- NELSON, W. **Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analyses**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 601 p.
- NITTA, K.H.; MAEDA, H. Creep behavior of high density polyethylene under a constant true stress. **Polymer Testing**, v. 29, p. 60-65, 2010.
- RYAN, T. **Estatística moderna para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier; 2009.
- SEGRESTIN, P.; JAILLOUX, J.M. Temperature in Soils and its Effect on the Aging of Synthetic Materials. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 7, p. 51-69, 1988.
- YEOH, W.; KORONIOS, A.; GAO, J. Enruring successful business intelligence systems implementation: multiple case studies in engineering asset management organizations. In: 4TH WORLD CONGRESS ON ENGINEERING ASSET MANAGEMENT, 2009, Greece. **Anais [...]**. Greece, 2009.
- ZANZINGER, H.; SAATHOFF, F. Long-term internal shear strength of a reinforced GCL based on shear creep rupture test. **Geotextile and Geomembranes**, v. 33, p. 43-50, 2012.

APÊNDICE D – ROTINAS DO SOFTWARE R

D.1. ADERÊNCIA À DISTRIBUIÇÃO NORMAL POR SHAPIRO-WILK E KOLMOGOROV-SMIRNOV

Parte 01: Resultados amostrais do geotêxtil intacto

```
getwd()
resistencia <- c(56.74,56.62,56.88,56.88,57.04,55.74,57.29,56.11,56.37,56.86)
#Histograma
m <- mean(resistencia)
std <- sqrt(var(resistencia))
hist(resistencia,
      density=4,
      breaks=4,
      right=F,
      main="",
      xlab="Tensile strength (kN/m)",
      ylab="Frequency",
      col="gray",
      border="gray",
      prob=T,
      col.axis="black",
      cex.lab = 1.5)
lines(density(resistencia,
               adjust=1.1),
      col="red",
      lwd=2)
#Diagrama de caixas
boxplot(resistencia,col="gray",ylab="Tensile strength (kN/m)", main="",
border="black", cex.lab = 1.5, pch=19)
boxplot.stats(resistencia)$out
#Shapiro Wilk
shapiro.test(resistencia)
#Kolmogorov-Smirnov
ks.test(resistencia, "pnorm", mean=mean(resistencia), sd=sd(resistencia))
#Gráfico Q-Q plot
qqnorm(resistencia,
        main="Q-Q plot normal",
        xlab="Quantis teóricos",
        ylab="Quantis amostrais")
qqline(resistencia, col="red")
```

Parte 02: Durabilidade por intemperismo

```
getwd()
setwd("D:/CursoR/Scripts")
library("readxl")
dados1 <- read_excel("dados1.xlsx", sheet = 3)
dados1
variaveis <- names(dados1)
par(mfrow = c(4,4))
#Shapiro Wilk e Kolmogorov-Smirnov
```

```

shapiro.test(dados1$inverno)
ks.test(dados1$inverno, "pnorm", mean=mean(dados1$inverno),
        sd=sd(dados1$inverno))
shapiro.test(dados1$primavera)
ks.test(dados1$primavera, "pnorm", mean=mean(dados1$primavera),
        sd=sd(dados1$primavera))
shapiro.test(dados1$verao)
ks.test(dados1$verao, "pnorm", mean=mean(dados1$verao),
        sd=sd(dados1$verao))
shapiro.test(dados1$outono)
ks.test(dados1$outono, "pnorm", mean=mean(dados1$outono),
        sd=sd(dados1$outono))
shapiro.test(dados1$invpri)
ks.test(dados1$invpri, "pnorm", mean=mean(dados1$invpri),
        sd=sd(dados1$invpri))
shapiro.test(dados1$invpriver)
ks.test(dados1$invpriver, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriver),
        sd=sd(dados1$invpriver))
shapiro.test(dados1$invpriverout)
ks.test(dados1$invpriverout, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriverout),
        sd=sd(dados1$invpriverout))
#Gráfico Q-Q plot
win.graph()
library("readxl")
dados1 <- read_excel("dados1.xlsx", sheet = 3)
dados1
variaveis <- names(dados1)
par(mfrow = c(3,3))
for(i in 2: length(variaveis)) {
  with(dados1, {
    dados <- eval(parse(text = variaveis[i]))
    qqnorm(dados, main = variaveis[i], xlab = "Quantis teóricos",
           ylab = "Quantis amostrais")
    args(dados)
    qqline(dados, col="red", lty = 2)
  })
}

```

Parte 03: Durabilidade por fluência à tração e intemperismo

```

getwd()
setwd("D:/CursoR/Scripts")
win.graph()
library("readxl")
dados1 <- read_excel("dados1.xlsx", sheet = 1)
dados1
variaveis <- names(dados1)
par(mfrow = c(4,4))

#Método Shapiro-Wilk
shapiro.test(dados1$inverno.r1)

```

```

ks.test(dados1$inverno.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$inverno.r1),
        sd=sd(dados1$inverno.r1))
#Shapiro Wilk e Kolmogorov-Smirnov
shapiro.test(dados1$inverno.r1)
ks.test(dados1$inverno.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$inverno.r1),
        sd=sd(dados1$inverno.r1))
shapiro.test(dados1$inverno.r2)
ks.test(dados1$inverno.r2, "pnorm", mean=mean(dados1$inverno.r2),
        sd=sd(dados1$inverno.r2))
shapiro.test(dados1$primavera.r1)
ks.test(dados1$primavera.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$primavera.r1),
        sd=sd(dados1$primavera.r1))
shapiro.test(dados1$primavera.r2)
ks.test(dados1$primavera.r2, "pnorm", mean=mean(dados1$primavera.r2),
        sd=sd(dados1$primavera.r2))
        shapiro.test(dados1$verao.r1)
ks.test(dados1$verao.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$verao.r1),
        sd=sd(dados1$verao.r1))
shapiro.test(dados1$verao.r2)
ks.test(dados1$verao.r2, "pnorm", mean=mean(dados1$verao.r2),
        sd=sd(dados1$verao.r2))
shapiro.test(dados1$outono.r1)
ks.test(dados1$outono.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$outono.r1),
        sd=sd(dados1$outono.r1))
shapiro.test(dados1$outono.r2)
ks.test(dados1$outono.r2, "pnorm", mean=mean(dados1$outono.r2),
        sd=sd(dados1$outono.r2))
shapiro.test(dados1$invpri.r1)
ks.test(dados1$invpri.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$invpri.r1),
        sd=sd(dados1$invpri.r1))
shapiro.test(dados1$invpri.r2)
ks.test(dados1$invpri.r2, "pnorm", mean=mean(dados1$invpri.r2),
        sd=sd(dados1$invpri.r2))
shapiro.test(dados1$invpriver.r1)
ks.test(dados1$invpriver.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriver.r1),
        sd=sd(dados1$invpriver.r1))
shapiro.test(dados1$invpriver.r2)
ks.test(dados1$invpriver.r2, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriver.r2),
        sd=sd(dados1$invpriver.r2))
shapiro.test(dados1$invpriverout.r1)
ks.test(dados1$invpriverout.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriverout.r1),
        sd=sd(dados1$invpriverout.r1))
shapiro.test(dados1$invpriverout.r2)
ks.test(dados1$invpriverout.r2, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriverout.r2),
        sd=sd(dados1$invpriverout.r2))
#Gráfico Q-Q plot
win.graph()
library("readxl")
dados1 <- read_excel("dados1.xlsx", sheet = 1)
dados1

```

```

variaveis <- names(dados1)
par(mfrow = c(4,4))
for(i in 2: length(variaveis)) {
  with(dados1, {
    dados <- eval(parse(text = variaveis[i]))
    qqnorm(dados, main = variaveis[i], xlab = "Quantis teóricos",
           ylab = "Quantis amostrais")
    args(dados)
    qqline(dados, col="red", lty = 2)
  })
}

```

D.2. INFERÊNCIAS PROBABILÍSTICAS

```

getwd()
setwd("D:/CursoR/Scripts")
library("readxl")
dados1 <- read_excel("dados1.xlsx", sheet = 1)
dados1
##Exemplo: Inverno R1 (sinergismo)
mean(dados1$inverno.r1)
sd(dados1$ inverno.r1)
#Probabilidade de 80%:  $P[X > 0,80T_{\text{máx}}]$ 
pnorm(q = 45.36,
      mean = 38.0,
      sd = 0.87,
      lower.tail=FALSE)
#Probabilidade de 60%:  $P[X > 0,60T_{\text{máx}}]$ 
pnorm(q = 34.02,
      mean = 38.0,
      sd = 0.87,
      lower.tail=FALSE)
#Probabilidade de 50%:  $P[X > 0,50T_{\text{máx}}]$ 
pnorm(q = 28.35,
      mean = 38.0,
      sd = 0.87,
      lower.tail=FALSE)

```

D.3. ADERÊNCIA À DISTRIBUIÇÃO WEIBULL POR KOLMOGOROV-SMIRNOV

```

#Referência: fitdistrplus: An R Package for Fitting Distributions (Delignette-Muller et al., 2014)
getwd()
setwd("D:/CursoR/Scripts")
library("readxl")
dados1 <- read_excel("dados1.xlsx", sheet = 1)
dados1
variaveis <- names(dados1)
##Réplicas 1: R1
#inverno: R1
dados1$inverno.r1

```

```

fitdistr(dados1$inverno.r1,"weibull")
ks.test(dados1$inverno.r1, "pweibull", scale=38.6688343, shape=55.9850580)
ks.test(dados1$inverno.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$inverno.r1),
        sd=sd(dados1$inverno.r1))
fits <- list(no = fitdistr(dados1$inverno.r1, "normal"),
            we = fitdistr(dados1$inverno.r1, "weibull"))
sapply(fits, function(i) i$loglik)
#inverno + primavera: R1
dados1$invpri.r1
fitdistr(dados1$invpri.r1,"weibull")
ks.test(dados1$invpri.r1, "pweibull", scale=31.4414384, shape=41.1870615)
ks.test(dados1$invpri.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$invpri.r1),
        sd=sd(dados1$invpri.r1))
fits <- list(no = fitdistr(dados1$invpri.r1, "normal"),
            we = fitdistr(dados1$invpri.r1, "weibull"))
sapply(fits, function(i) i$loglik)
#inverno + primavera + verão: R1
dados1$invpriver.r1
fitdistr(dados1$invpriver.r1,"weibull")
ks.test(dados1$invpriver.r1, "pweibull", scale=26.9669345, shape=26.3388976)
ks.test(dados1$invpriver.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriver.r1),
        sd=sd(dados1$invpriver.r1))
fits <- list(no = fitdistr(dados1$invpriver.r1, "normal"),
            we = fitdistr(dados1$invpriver.r1, "weibull"))
sapply(fits, function(i) i$loglik)
#inverno + primavera + verão + outono: R1
dados1$invpriverout.r1
fitdistr(dados1$invpriverout.r1,"weibull")
ks.test(dados1$invpriverout.r1, "pweibull", scale=25.0490749, shape=33.5005577)
ks.test(dados1$invpriverout.r1, "pnorm", mean=mean(dados1$invpriverout.r1),
        sd=sd(dados1$invpriverout.r1))
fits <- list(no = fitdistr(dados1$invpriverout.r1, "normal"),
            we = fitdistr(dados1$invpriverout.r1, "weibull"))
sapply(fits, function(i) i$loglik)
#ACUMULADO: R1 [ver nota de página junto aos resultados]
getwd()
setwd("D:/CursoR/Scripts")
library("readxl")
dados1 <- read_excel("dados1.xlsx", sheet = 2)
dados1
variaveis <- names(dados1)
dados1$acumulado
fitdistr(dados1$acumulado,"weibull")
ks.test(dados1$acumulado, "pweibull", scale=32.3985807, shape=5.9404374)
ks.test(dados1$acumulado, "pnorm", mean=mean(dados1$acumulado),
        sd=sd(dados1$acumulado))
fits <- list(no = fitdistr(dados1$acumulado, "normal"),
            we = fitdistr(dados1$acumulado, "weibull"))
sapply(fits, function(i) i$loglik)
##Réplicas 2: R2

```

```
#inverno: R2
dados1$inverno.r2
fitdistr(dados1$inverno.r2,"weibull")
ks.test(dados1$inverno.r2, "pweibull", scale=38.0476033, shape=55.2154915)
#inverno + primavera: R2
dados1$invpri.r2
fitdistr(dados1$invpri.r2,"weibull")
ks.test(dados1$invpri.r2, "pweibull", scale=32.6357348, shape=21.6059580)
#inverno + primavera + verão: R2
dados1$invpriver.r2
fitdistr(dados1$invpriver.r2,"weibull")
ks.test(dados1$invpriver.r2, "pweibull", scale=27.7306012, shape=52.4383804)
#inverno + primavera + verão + outono: R2
dados1$invpriverout.r2
fitdistr(dados1$invpriverout.r2,"weibull")
ks.test(dados1$invpriverout.r2, "pweibull", scale=25.2059744, shape=28.2666490)
```