

Universidade Federal de Ouro Preto

Núcleo de Geotecnia

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia
PPGEO

Dissertação

**Metodologia para
Determinação da
Probabilidade de Falha
Durante a Vida de Serviço de
Projetos de Geossintéticos.**

Beatriz Mydori Carvalho Urashima

Ouro Preto
2022



UFOP

Beatriz Mydori Carvalho Urashima

Metodologia para Determinação da Probabilidade de Falha Durante a Vida de Serviço de Projetos de Geossintéticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Área de concentração: Obras de Terra e Mecânica das Rochas.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Ribeiro Duarte.

Ouro Preto, 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

U72d Urashima, Beatriz Mydori Carvalho.
Determinação da probabilidade de falha de geossintéticos durante a vida de serviço de projetos. [manuscrito] / Beatriz Mydori Carvalho Urashima. - 2022.
58 f.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Ribeiro Duarte.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia.

1. Geossintéticos. 2. Vida útil (Engenharia) - Vida de serviço de projetos. 3. Estatística não-paramétrica - Núcleos estimadores. 4. Confiabilidade (Engenharia). I. Duarte, Anderson Ribeiro. II. Ferreira, Lucas Deleon. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Beatriz Mydori Carvalho Urashima

Metodologia para determinação da probabilidade de falha durante a vida de serviço de projetos de geossintéticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**

Aprovada em 30 de maio de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profª. Drª Delma de Matos Vidal - (Instituto Tecnológico de Aeronáutica)
Prof. Dr. Jefferson Lins da Silva - (Universidade de São Paulo)

O Prof. Dr Lucas Deleon Ferreira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 15/08/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Deleon Ferreira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/08/2022, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0380341** e o código CRC **9DFB9C41**.

AGRADECIMENTOS

A busca por conhecimentos não se encerrou com mais esta etapa concluída, pelo contrário, a vontade de crescer e compreender este vasto mundo da Engenharia apenas aumentou. Às pessoas que me incentivaram, apoiaram e inspiraram até aqui, o meu muito obrigada.

Aos meus pais, minha base que permitiu que eu conseguisse chegar até aqui, não tenho formas de expressar a minha eterna gratidão.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Lucas Deleon; ao meu coorientador Prof. Dr. Anderson Duarte e à Profa. Dra. Denise Urashima, conselheira, amiga e mãe. Ao Eng. Gelmo Chiari, obrigada pelo apoio.

Por fim, sou grata ao Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO), à Universidade Federal de Ouro Preto, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

RESUMO

Diversos campos da Engenharia empregam ferramental estatístico para a execução de análises de risco ao longo da vida de serviço de projetos, com intuito de fomentar indicadores de confiabilidade. Os geossintéticos são produtos de matriz polimérica empregados nas últimas décadas em obras de Engenharia, tais como, geotécnicas, ambientais e de mineração. Para os geossintéticos, a análise da durabilidade usualmente se desenvolve a partir de experiência pregressa e ainda é assunto recorrente em diversos trabalhos. Até então, existe consenso do emprego de fatores de redução para o dimensionamento desses sistemas. Este artigo apresenta uma nova abordagem, complementar, para a determinação da probabilidade de falha ao longo da vida de serviço de projetos de geossintéticos por meio de estatística não paramétrica, com emprego de núcleos estimadores e técnica de reamostragem (Bootstrap), para determinação das probabilidades de falha intrínsecas aos problemas de degradação com base na função geossintética pretendida ou propriedade de desempenho, que irão nortear a censura a ser empregada. Isso é feito dentro das condições de contorno estabelecidas em projeto, de forma a garantir a sua confiabilidade. Abordagens Bayesianas guiadas pelos próprios dados são empregadas. Adicionalmente, um estudo de caso é apresentado para exemplificar o uso das sub-rotinas desenvolvidas por meio do software R, no qual foi possível avaliar as probabilidades para distintos níveis de censura estabelecidos para uma propriedade parâmetro de um geossintético exposto às intempéries. Além disso, o estudo de caso possibilitou diferenciar a somatória de efeitos degradantes e a exposição total: para probabilidade da variável aleatória X ser maior que 70% da resistência disponível inicial de serviço do material, ou seja, $P(X > 0,7R)$, foram encontrados valores de probabilidades de 1,00 (somatório) e 0,56 (exposição total). A aplicação apresentada demonstra a quão promissora pode ser a metodologia ora apresentada na análise da confiabilidade da vida de serviço de projeto de um sistema que emprega geossintéticos.

Palavras chave: Geossintéticos; Vida de serviço de projetos; Durabilidade; Núcleos estimadores; Confiabilidade.

ABSTRACT

Several fields of Engineering use statistical tools to carry out risk analyzes throughout the life of projects, with the aim of promoting reliability indicators. Geosynthetics are polymer matrix products used in recent decades in engineering works, such as geotechnical, environmental and mining. For geosynthetics, the analysis of durability usually develops from previous experience and is still a recurrent subject in several works. Until then, there is a consensus on the use of reduction factors for the sizing of these systems. This article presents a new and complementary approach for determining the failure probability over the lifetime of geosynthetic projects by means of non-parametric statistics, using kernel estimator and the resampling technique (Bootstrap), to determine the probabilities of failure. failure intrinsic to degradation problems based on the intended geosynthetic function or performance characteristic, which will guide the censored to be employed. This is done within the boundary conditions established in the project, in order to guarantee its reliability. Bayesian approaches guided by the data themselves are employed. Additionally, a case study is presented to exemplify the use of subroutines developed using the R software, in which it was possible to evaluate the probabilities for different levels of censored established for a parameter property of a material exposed to bad weather. In addition, the case study made it possible to differentiate the sum of degrading effects and the synergism between them: for the probability of the random variable X to be greater than 70% of the available strength of the geosynthetic, that is, $P(X > 0.7R)$, were probability values of 1.00 (sum) and 0.56 (synergism) were found. The application presented demonstrates how promising the methodology presented here can be in the analysis of the reliability of the design life of a system that uses geosynthetics.

Key words: Geosynthetics, Lifetime failure, Durability, Kernel estimators, Reliability.

Lista de Figuras

Figura 1: Propriedades requerida e disponíveis necessárias de um geossintético durante o armazenamento e transporte, construção e uso.....	5
Figura 2: Propriedade disponível e requerida em função do tempo.	5
Figura 3: Fluxograma representativo da metodologia proposta.	16
Figura 4: Pórticos de exposição.....	22
Figura 5: Camada de poeira formada na superfície do material exposto.....	23
Figura 6: Resistência retida por período de exposição: A) Verão; B) Outono; C) Inverno; D) Primavera.....	24
Figura 7: FDP por Kernel (gaussiana) em banco de dados sem reamostragem: A) Verão; B) Outono; C) Inverno; D) Primavera.	25
Figura 8: FDP por Kernel (gaussiana) em banco de dados com reamostragem: A) Verão; B) Outono; C) Inverno; D) Primavera.	25
Figura 9: FDP por Kernel (gaussiana) em banco de dados sem reamostragem: G) Verão+Outono+Inverno+Primavera; H) Tempo total de exposição (365 dias).	26

Lista de Quadros

Quadro 1: Características climáticas das estações.....	22
Quadro 2: Probabilidades para as distintas condições de exposição.	28
Quadro 3: Probabilidades das resistências à tração das amostras expostas às estações climáticas: somatório dos efeitos e exposição total.	29

Lista de Apêndices

APÊNDICE A.....	39
-----------------	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	JUSTIFICATIVA	7
1.3	OBJETIVOS.....	8
1.3.1	Objetivo Principal.....	8
1.3.2	Objetivos Específicos	8
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	9
2	ARTIGO: METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE FALHA DURANTE A VIDA DE SERVIÇO DE PROJETOS DE GEOSSINTÉTICOS ¹	10
2.1	INTRODUÇÃO.....	13
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
2.3	EXEMPLO DE EMPREGO DA METODOLOGIA PROPOSTA	21
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
3	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	32
	APÊNDICE A	39

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Antropoceno iniciou-se, provavelmente, ao final do século XVIII, e é caracterizado como o período biológico que reflete as mudanças humanas na Terra. Neste, o ser humano é o ator central e gerador dos maiores impactos no espaço em que habita. Os desastres naturais que já afetaram bilhões de pessoas no mundo, as mudanças climáticas, extinções de espécies, entre outras alterações no meio ambiente são exemplos das consequências geradas (Pinto *et al.*, 2020).

A partir de meados dos anos 1970, os países começaram a busca por soluções que proporcionassem a mitigação dos impactos gerados pelo desenvolvimento da sociedade sobre o meio, com o objetivo de se reduzir impactos ambientais (Leite *et al.*, 2020).

O desenvolvimento sustentável começou a ser discutido a nível global, na década de 70, com a Conferência de Estocolmo em 1972, marcada como a 1ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Outras conferências a nível global, seguiram a conferência de Estocolmo ao longo dos anos. Em 1992, a Organização das Nações Unidas (ONU) realizou a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, também conhecida como Rio 92 (Schussel, 2004).

A fim de reforçar e identificar as lacunas deixadas na Rio 92, reuniões de revisões e ajustes foram realizadas (Dixon *et al.*, 2017). Nesse contexto, a partir de 2016, a ONU instalou o programa Transformando nosso Mundo: Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável., que estabeleceu 17 objetivos principais a serem alcançados pelos países até o ano de 2030 (Le Blanc, 2015; Cenci, 2018).

Os dezessete objetivos são: 1- a erradicação da pobreza; 2- fome zero e agricultura sustentável; 3- saúde e bem-estar; 4- educação de qualidade; 5- igualdade de gênero; 6- água potável e saneamento; 7- energia acessível e limpa; 8- trabalho decente e crescimento econômico; 9- indústria, inovação e infraestrutura; 10- redução das desigualdades; 11- cidades e comunidades

sustentáveis; 12- consumo e produção responsáveis; 13- ação contra a mudança global do clima; 14- vida na água; 15- vida terrestre; 16- paz, justiça e instituições eficazes; 17- parcerias e meios de implementação (Lim *et al.*, 2018).

Ressalta-se que há uma questão temporal envolvida neste cenário, as ações que são tomadas atualmente serão as causadoras de impactos momentâneos e futuros, o que gera um ciclo de relações intertemporais e espaciais, e a extrapolação de fronteiras continentais (Souza & Corazza, 2017). Dessa forma, as ações mitigadoras devem ser incentivadas e efetivadas ao redor de todo o mundo, o que possibilitaria o desenvolvimento sustentável sem impactar o desenvolvimento das gerações futuras.

Neste contexto, os geossintéticos entram como materiais possíveis de serem empregados para contribuir com o êxito com esses objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). Geossintéticos são materiais manufaturados poliméricos, aplicados em obras hidráulicas, geotécnicas, rodoviárias (Mounes *et al.*, 2014), entre outros campos da engenharia civil e ambiental, e podem desempenhar diversas funções a depender do tipo utilizado e como foi aplicado (Müller & Saathoff, 2015).

Os geossintéticos podem ser agrupados em: geotêxteis, produto correlato aos geotêxteis, barreiras geossintéticas e geocompostos (ISO TS 13434, 2020; ABNT ABNT NBR ISO 10318-1, 2021). Esses produtos podem exercer uma ou mais funções dentro de uma aplicação, tais como: barreira, drenagem, filtragem, proteção, reforço, separação, estabilização, alívio de tensão para revestimento de asfalto e controle de erosão superficial (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021).

A utilização de geossintéticos ocorre desde meados dos anos 1970 e o seu campo de aplicação se expande exponencialmente, isso devido a diversos fatores, dentre eles o seu apelo ambiental. Em muitos países, tal como nos Estados Unidos, são considerados emergentes e necessários, pois possibilitam uma abordagem sustentável para a construção civil (Blond *et al.*, 2019).

O trabalho de Chang *et al.* (2019) aborda o contexto da atuação da engenharia geotécnica e a pegada de carbono (*carbon footprint*)¹ deixada pelas soluções empregadas a fim de mitigar os riscos inerentes às obras que, quando falham, podem gerar perdas de vidas e impactos ambientais significativos. Os autores destacam que a produção de cimento para estabilização de solo gera

¹ A pegada de carbono (*carbon footprint*) é uma metodologia criada para medir as emissões de gases estufa (GEEs), por pessoas, empresas, governos e atividades. A quantidade desta emissão é expressa em carbono equivalente.

cerca de 8,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano em todo o mundo. Neste contexto, a aplicação de geossintéticos em diversas obras geotécnicas que dependem de estruturas em concreto pode acarretar na redução de emissões de carbono, conforme será apresentado em alguns estudos, contribuindo para o alcance de ODS.

Lamont-Black *et al.* (2016) estudaram a aplicação de geossintéticos para a estabilização de um aterro de rodovia, mostrando que o reforço da encosta foi conseguido com uma redução de custo de 29% e de 40% na pegada de carbono, se comparado a um aterro adjacente que havia sido remediado um ano antes com solução convencional, em concordância com os objetivos 9, 11 e 13, principalmente.

Jahan *et al.* (2018) apresentam um exemplo de aplicação de geossintéticos em concordância com, principalmente, os objetivos 3, 6, 12, 14 e 15 da Agenda 2030. Neste artigo, os autores abordam um estudo de caso do emprego de Sistemas Geossintéticos de Confinamento para a redução do teor de alumínio na água gerada pelo processo de potabilização de uma estação de tratamento em Halifax, Canadá. A água apresentava teores de alumínio muito maiores do que aquele permitido pelas agências regulatórias canadenses e após o emprego dos Sistemas Geossintéticos de Confinamento esses teores chegaram próximos àqueles permitidos.

Outro exemplo da contribuição dos geossintéticos para a saúde e bem-estar; para o acesso de água potável e saneamento a todos; para o consumo e produção responsáveis, e para a manutenção da vida na água e na terra, é apresentado por Lange *et al.* (2010). O estudo mostra que geossintéticos do tipo barreira geossintética argilosa (GBR-C) podem ser empregados na redução de metais presentes em água residuária de drenagem ácida de rochas, passivo ambiental preocupante para a indústria da mineração. Neste estudo, o GBR-C mostrou-se ser capaz de remover mais de 80% dos metais Cu, Cd, Ni, Mn e Zn.

Rahimi *et al.* (2011) e Blond *et al.* (2019) são exemplos de autores que mostram a aplicação de geossintéticos em concordância com o objetivo 2, fome zero e agricultura sustentável, abordando o emprego de geomembranas em canais de irrigação. Rahimi *et al.* (2011) estudam o caso da rede de irrigação e drenagem de Moghan, Irã, onde geomembrana foi aplicada para solucionar o problema de dispersividade física do solo do subleito do canal revestido de concreto.

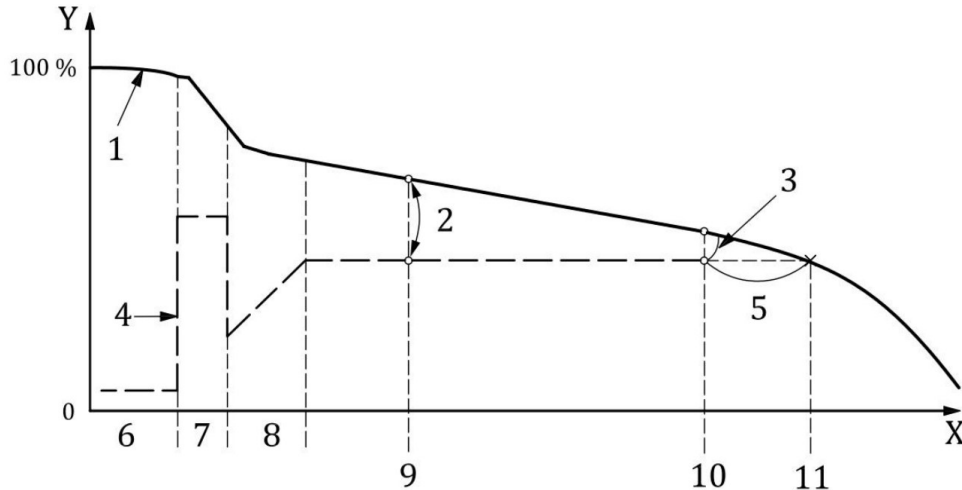
Porém, projetos com geossintéticos requerem, inicialmente, o conhecimento da propriedade índice (característica) de determinados parâmetros, ou seja, o valor nominal e de tolerância, que são obtidos por meio de ensaios de caracterização normatizados. Condições específicas de projeto, bem como solicitações de campo vão impor reduções às propriedades características dos geossintéticos, que são traduzidas pelos fatores de redução parciais. A propriedade funcional expressa um parâmetro de comportamento do geossintético sob as condições de utilização, portanto, tal propriedade tende a diminuir com o tempo e atingir limites que podem comprometer o desempenho do geossintético. Assim sendo, a propriedade requerida no projeto tem de ser menor que a propriedade funcional dentro de limites pré-estabelecidos, tradução do fator de segurança, que 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 (ISO TS 13434, 2020; Koerner et al., 2016; Vidal *et al.*, 1999, Sarsby, 2007; Shukla e Yin, 2006; Shukla, 2016, Lopes e Lopes, 2010; Marg, 2012).

O conceito durabilidade de um geossintético pode ser compreendido como a capacidade do material desempenhar satisfatoriamente as funções para as quais foi especificado, dentro de limites aceitáveis, a fim de garantir a atuação adequada do geossintético ao longo da sua vida de serviço de projeto, na qual estará em contato com fatores de degradação (Allen, 2016; ISO/ TR 20432, 2007; ISO TS 13434, 2020; ASTM D 5819, 2021).

A propriedade disponível e a propriedade requerida podem variar com os eventos que ocorrerem entre a fabricação e a vida de serviço de projeto, devido ao envelhecimento ou degradação do material. A Figura 1 mostra um exemplo esquemático em que a reta representada pelo 4 indica a propriedade requerida, a reta número 10 indica o final da vida de serviço de projeto. Na Figura 2, na curva 3, a condição na qual a propriedade disponível é maior que a propriedade requerida, no final da vida de serviço de projeto, é satisfeita, o mesmo não ocorre na curva 4.

A norma ISO TS 20432, 2007 traz o conceito de fator de redução total para a função reforço como um produto dos fatores de redução parciais e ainda um fator de incertezas. O fator de redução está associado a efeitos conhecidos que minoram a resistência do reforço ao longo da sua vida de serviço de projeto como fluência, danos de instalação, danos ambientais e outros. Os fatores de redução incluem, por exemplo, os efeitos de fluência, de danos mecânicos durante a instalação, de degradação química, efeitos de exposição às intempéries (radiação UV), de cargas

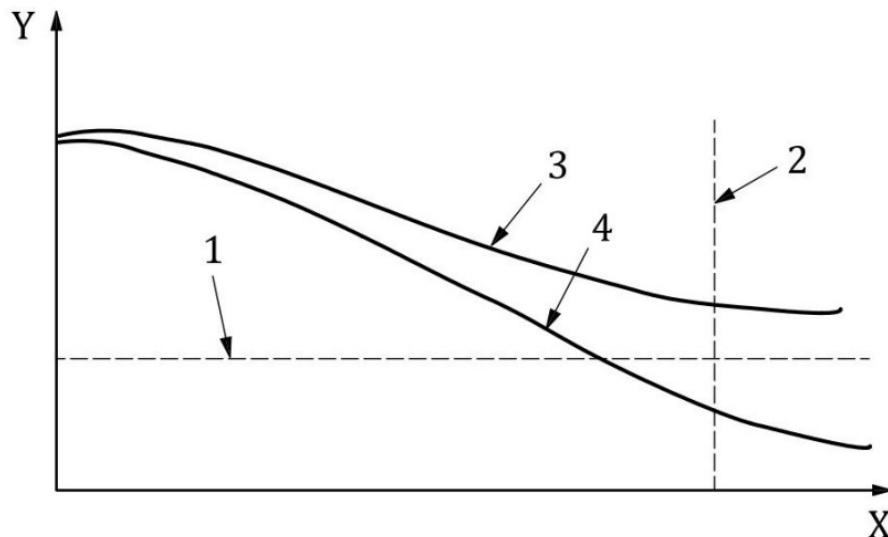
cíclicas, de emendas e outros. Ensaio laboratoriais e de campo podem ser solicitados para avaliar condições específicas de projetos e estimar os valores dos referidos fatores (Vidal *et al.*, 1999; Koerner, 2005; Hufenus *et al.*, 2005; Jeon *et al.*, 2006).



X-time; Y-propriedade do geossintético, expressa como porcentagem do seu valor original; 1-propriedade disponível; 2-margem entre a propriedade requerida e a disponível; 3-margem de segurança de projeto; 4-propriedade requerida; 5-margem de segurança entre a vida de serviço de projeto e a falha; 6-tempo antes da instalação (armazenamento e transporte); 7-tempo de instalação; 8-duração da construção; 9-tempo intermediário durante o uso normal; 10-vida de serviço; 11-falha do material.

Figura 1: Propriedades requerida e disponíveis necessárias de um geossintético durante o armazenamento e transporte, construção e uso.

Fonte: ISO TS 13434, 2020.



1-propriedade requerida; 2-final da vida de serviço de projeto; 3-propriedades disponíveis no primeiro conjunto de condições (aceitável); 4-propriedades disponíveis sob o segundo conjunto de condições (não aceitável).

Figura 2: Propriedade disponível e requerida em função do tempo.

Fonte: ISO TS 13434, 2020.

A determinação de uma distribuição de probabilidade que represente o comportamento de um sistema genérico pode permitir a estimativa da sua vida útil, bem como o cálculo da porcentagem de falha a qualquer momento (probabilidade), ou, inversamente, o tempo em que uma certa porcentagem de falha ocorrerá (ASTM G166, 2000).

Normas como a ASTM G166 e G172 apresentam metodologias estatísticas paramétricas para calcular uma estimativa da vida útil funcional de materiais genéricos expostos às solicitações. Em ambas, é recomendada a aplicação da distribuição de Weibull.

Os efeitos do ambiente sobre o geossintético e na sua probabilidade de falha durante o tempo de vida de serviço de projeto devem ser avaliados por meio de ensaios apropriados, o que requer a determinação das funções primárias a serem desempenhadas pelo material e dos processos de degradação associados (ASTM D5819, 2021; ISO TS 13434, 2020).

Esta dissertação apresenta uma nova e complementar abordagem para o dimensionamento com geossintéticos, expondo técnicas estatísticas não paramétrica de avaliação das probabilidades intrínsecas à durabilidade do material, com base na função geossintética pretendida ou propriedade de desempenho, que irão nortear a censura a ser empregada, dentro das condições de contorno estabelecidas em projeto, de forma agregar maior confiabilidade a ele.

No dimensionamento de projetos que empregam geossintéticos, deve-se avaliar a durabilidade do material como parte integrante do processo de especificação. Desta forma, neste trabalho define-se a censura como o percentual da propriedade disponível inicial de serviço, que ao longo da vida de serviço de projeto varia em função da degradação. Os percentuais de propriedades de desempenho do geossintético devem ser estabelecidos em função do fator de segurança constituído em projeto. Visto que, no momento que a propriedade disponível for igual a requerida a probabilidade de falha é igual a 1 (ISO TS 13434, 2020).

1.2 JUSTIFICATIVA

Os geossintéticos são materiais em sintonia com o desenvolvimento sustentável e com as primícias preconizadas na Agenda 2030. Para aplicação destes materiais em obras de Engenharia, tais como, geotécnicas, ambientais e de mineração, é necessário o entendimento de seu comportamento ao longo da vida de serviço de projeto, para que não ocorram falhas.

Em projetos com geossintéticos, existe um consenso na literatura do emprego de fatores de redução no dimensionamento, de forma que a propriedade disponível seja compatível com a propriedade requerida, ao longo da vida de serviço de projeto. Os fatores de redução são estimados por meio de conhecimento pregresso, seja por experiência de comportamento em campo, ensaios com os geossintéticos submetidos a condição da obra, ou em situações que simulem condições da obra, e permite, atualmente, interferência sobre as diretrizes para avaliação da durabilidade. Para cada tipo de solicitação ao qual o material estará submetido deve ser considerado um valor de fator de redução parcial e, ao final do dimensionamento, é realizada a multiplicação entre esses fatores parciais para a obtenção de um fator de redução global. Ressalta-se que os fatores de redução parciais a serem considerados são eventos independentes.

Diversos campos da Engenharia empregam ferramental estatístico para execução de análises de risco ao longo da vida de serviço de projetos, com a finalidade de fomentar indicadores de confiabilidade. O emprego da estatística paramétrica, para interpretação dos dados da vida útil é recorrente, entretanto, faz-se necessário suposições quanto à distribuição da variável populacional, tais como, sobre os parâmetros populacionais e suas respectivas estimativas, bem como da necessidade de aderência estatística dos dados a distribuição adotada.

Em situações em que a variável populacional analisada não segue uma distribuição conhecida e/ou o tamanho da amostra é relativamente pequena, a aplicação de técnicas da estatística não-paramétrica são, particularmente, adaptáveis.

O emprego de estatística não paramétrica por meio de núcleos estimadores de Kernel possibilita o ajuste da FDP ao comportamento dos dados amostrais, dessa forma, se este apresentar comportamento similar à uma distribuição previamente conhecida, tal como uma Normal, a FDP resultante será muito próxima à uma Normal, com pequenas variações. Ou seja, esta técnica

abrange tanto os casos em que a aplicação de técnicas estatísticas paramétricas seria efetiva, quanto naqueles em que o resultado obtido apresentaria menor aderência à distribuição conhecida (Chi-Yang Chu et al., 2015). Desta forma, a estatística não paramétrica de núcleos estimadores é capaz de fornecer distribuições estimadas mesmo para amostras pequenas, mas uma perda de precisão é previsível. Para estes cenários, as técnicas de reamostragem são altamente eficientes (Slaoui, 2015).

Desta forma, o presente trabalho apresenta uma metodologia não paramétrica, com emprego de núcleos estimadores e técnica de reamostragem (*Bootstrap*), para determinação das probabilidades referentes ao comportamento de falha do material, de forma a permitir atribuição de confiabilidade estatística ao projeto de dimensionamento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Principal

O presente trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia não paramétrica de determinação da probabilidade de falha durante a vida de projeto de geossintéticos, em complemento à metodologia que considera fatores de redução.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como pontos específicos desta pesquisa destacam-se:

- Propor uma metodologia não paramétrica de avaliação das probabilidades intrínsecas à durabilidade de geossintéticos;
- Propor uma rotina no *software* R que possibilite a aplicação da metodologia proposta;
- Explorar os possíveis formatos da função densidade de probabilidade, a partir de uma base de dados, sem impor nenhuma forma paramétrica;
- Definir o tempo censura para a determinação da probabilidade de desempenho de geossintéticos;
- Validar a metodologia proposta por meio de estudo de caso;
- Apresentar uma nova abordagem, complementar, para a confiabilidade no dimensionamento com geossintéticos.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em três capítulos, além de um tópico de referências bibliográficas, conforme descritos:

Capítulo 1: Introdução

O Capítulo trata da introdução ao tema do trabalho, explicando brevemente o que será realizado ao longo da pesquisa, explicando brevemente o que são geossintéticos, sua importância e o conceito de fatores de redução. Além de apresentar a justificativa e os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: Artigo: Metodologia para Determinação da Probabilidade de Falha Durante a Vida de serviço de projetos de Geossintéticos

O Capítulo apresenta o artigo submetido em periódico para a defesa da dissertação de mestrado, conforme o regimento do programa de pós-graduação.

Capítulo 3: Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Este capítulo contém as conclusões e comentários finais acerca do trabalho realizado e sugestões para pesquisas futuras sobre o tema.

Referências

Encontra-se neste item a listagem das referências consultadas para realização desse trabalho.

CAPÍTULO 2

2 ARTIGO: METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE FALHA DURANTE A VIDA DE SERVIÇO DE PROJETOS DE GEOSSINTÉTICOS ¹

Os resultados e as discussões obtidos neste trabalho de mestrado estão aqui apresentados no formato de artigo científico, que foi submetido conforme o regimento do programa de pós-graduação¹.

RESUMO

Diversos campos da Engenharia empregam ferramental estatístico para a execução de análises de risco ao longo da vida de serviço de projetos, com intuito de fomentar indicadores de confiabilidade. Os geossintéticos são produtos de matriz polimérica empregados nas últimas décadas em obras de Engenharia, tais como, geotécnicas, ambientais e de mineração. Para os geossintéticos, a análise da durabilidade usualmente se desenvolve a partir de experiência pregressa e ainda é assunto recorrente em diversos trabalhos. Até então, existe consenso do emprego de fatores de redução para o dimensionamento desses sistemas. Este artigo apresenta uma nova abordagem, complementar, para a determinação da probabilidade de falha ao longo da vida de serviço de projetos de geossintéticos por meio de estatística não paramétrica, com emprego de núcleos estimadores e técnica de reamostragem (*Bootstrap*), para determinação das probabilidades de falha intrínsecas aos problemas de degradação com base na função geossintética pretendida ou propriedade de desempenho, que irão nortear a censura a ser empregada. Isso é feito dentro das condições de contorno estabelecidas em projeto, de forma a garantir a sua confiabilidade. Abordagens Bayesianas guiadas pelos próprios dados são empregadas. Adicionalmente, um estudo de caso é apresentado para exemplificar o uso das subrotinas desenvolvidas por meio do *software* R, no qual foi possível avaliar as probabilidades para distintos níveis de censura estabelecidos para uma propriedade parâmetro de um geossintético exposto às intempéries. Além disso, o estudo de caso possibilitou diferenciar a somatória de efeitos degradantes e a exposição total: para probabilidade da variável aleatória X ser maior que 70% da resistência disponível inicial de serviço do material, ou seja, $P(X > 0,7R)$, foram

¹Artigo submetido.

Autores: Beatriz Urashima^a; Lucas Deleon^a, Anderson Duarte^a, Denise Urashima^b, Mag Guimarães^b.

^a Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, MG - Brazil

^b Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica, MG.

encontrados valores de probabilidades de 1,00 (somatório) e 0,56 (exposição total). A aplicação apresentada demonstra a quão promissora pode ser a metodologia ora apresentada na análise da confiabilidade da vida de serviço de projeto de um sistema que emprega geossintéticos.

Palavras-chave: Geossintéticos, Vida de serviço de projetos, Durabilidade, Núcleos estimadores, *Bootstrap*, Confiabilidade.

ABSTRACT

Several fields of Engineering use statistical tools to carry out risk analyzes throughout the life of projects, with the aim of promoting reliability indicators. Geosynthetics are polymer matrix products used in recent decades in engineering works, such as geotechnical, environmental, and mining. For geosynthetics, the analysis of durability usually develops from previous experience and is still a recurrent subject in several works. Until then, there is a consensus on the use of reduction factors for the sizing of these systems. This article presents a new and complementary approach for determining the failure probability over the lifetime of geosynthetic projects by means of non-parametric statistics, using kernel estimator and the resampling technique (Bootstrap), to determine the probabilities of failure. failure intrinsic to degradation problems based on the intended geosynthetic function or performance characteristic, which will guide the censored to be employed. This is done within the boundary conditions established in the project, to guarantee its reliability. Bayesian approaches guided by the data themselves are employed. Additionally, a case study is presented to exemplify the use of subroutines developed using the R software, in which it was possible to evaluate the probabilities for different levels of censored established for a parameter property of a material exposed to bad weather. In addition, the case study made it possible to differentiate the sum of degrading effects and the synergism between them: for the probability of the random variable X to be greater than 70% of the available strength of the geosynthetic, that is, $P(X > 0.7R)$, were probability values of 1.00 (sum) and 0.56 (synergism) were found. The application presented demonstrates how promising the methodology presented here can be in the analysis of the reliability of the design life of a system that uses geosynthetics.

Keywords: Geosynthetics, Lifetime failure, Durability, Kernel, Bootstrap, Reliability.

2.1 INTRODUÇÃO

Os geossintéticos são produtos de matriz polimérica empregados com sucesso nas últimas décadas em obras de Engenharia, tais como geotécnicas, ambientais e de mineração. A utilização desses produtos conduz para soluções tecnológicas, inovadoras e sustentáveis. O incremento do emprego destes materiais ocorre por múltiplos fatores, tais como a redução no impacto ambiental gerado na construção, na operação e na vida de serviço dessas obras, em relação aos projetos convencionais, aliado a facilidade de instalação, transporte e potencial para soluções emergenciais e inovadoras. Tudo isso faz desses materiais uma referência, tanto pelo apelo tecnológico, como pela minimização de danos ao meio ambiente (Lamont-Black *et al.*, 2016; Jahan *et al.*, 2018; Blond *et al.*, 2019; Chang *et al.*, 2019).

Além disso, há uma variedade de produtos geossintéticos disponíveis no mercado, bem como funções que estes materiais podem desempenhar, o que reflete na versatilidade da aplicação destes, e permite as mais diversas alternativas de soluções tradicionais ou mesmo inéditas. O emprego e avanço tecnológico dos geossintéticos ocorrem mundialmente, uma vez que há um processo contínuo de melhora do desempenho dos produtos existentes, baseado em pesquisas e na observação do comportamento do geossintético durante sua vida de útil de projeto. Essa evolução acarreta desenvolvimento sustentável e proporciona construções de estruturas mais eficientes e seguras (Mounes *et al.*, 2014, Müller e Saathoff, 2015; Dixon *et al.*, 2017; Touze, 2021).

Ao projetar sistemas com geossintéticos é essencial avaliar quais as propriedades relevantes para o desempenho adequado dentro de sua vida útil de serviço. A vida útil de um material é o período em que ele é capaz de atender as especificações de projeto, até atingir a situação crítica para a qual foi dimensionado. A determinação de uma distribuição que represente o comportamento do sistema permite a estimativa do seu tempo de vida, o cálculo da porcentagem de falha a qualquer momento (probabilidade), ou, inversamente, o tempo em que uma certa porcentagem de falha ocorrerá (ASTM G166, 2000).

O conceito durabilidade de um geossintético pode ser compreendido como a capacidade de desempenhar satisfatoriamente as funções para as quais foi especificado, dentro de limites aceitáveis, a fim de garantir a atuação adequada do material ao longo da sua vida de serviço de

projeto, na qual o geossintético estará em contato com fatores de degradação (Allen, 2016; ISO/ TR 20432, 2007; ISO TS 13434, 2020; ASTM D 5819, 2021).

Projetos de estruturas com geossintéticos requerem, inicialmente, o conhecimento da propriedade índice (característica), que é obtida por meio de ensaios de caracterização normatizados. Condições específicas de projeto, bem como solicitações de campo, vão impor reduções às propriedades características dos geossintéticos, que são usualmente traduzidas pelos fatores de redução parciais. A propriedade funcional (disponível) expressa um parâmetro de comportamento do geossintético sob as condições de utilização, portanto, tal propriedade tende a diminuir com o tempo, e pode atingir limites comprometedores para o desempenho da estrutura. Diante disso, a propriedade requerida prevista em projeto tem de ser menor que a propriedade funcional (disponível) prevista dentro de limites pré-estabelecidos, que considera: a função desempenhada pelo geossintético, a natureza da matriz polimérica, o processo de fabricação, a influência de fatores impostos pela aplicação em campo. Caso a propriedade requerida ao longo do tempo previsto com vida útil ultrapasse a propriedade disponível a probabilidade de falha passa a ser significativa (Vidal *et al.*, 1999; Shukla e Yin, 2006; Sarsby, 2007; Lopes e Lopes, 2010; Marg, 2012; Shukla, 2016; Koerner et al., 2016; ISO TS 13434, 2020).

Os efeitos do ambiente de aplicação do geossintético sobre o seu tempo de vida de serviço de projeto e, conseqüentemente, na sua probabilidade de falha, devem ser avaliados por meio de ensaios apropriados, o que requer a determinação das funções primárias a serem desempenhadas pelo material e dos processos de degradação associados (ASTM D5819, 2021).

A norma ISO/ TR 20432, 2007 traz o equacionamento do fator de redução total, utilizado para geossintéticos empregados como reforços em solos, como produto dos fatores de redução parciais. Assim, o efeito combinado de diferentes agentes de degradação é considerado por meio do produto dos fatores de redução parciais associados a cada um desses agentes e ainda um fator de incertezas. O fator de redução está associado aos efeitos que podem afetar a propriedade disponível do geossintético para desempenhar determinada função ao longo da vida de serviço de projeto. Dessa forma, os fatores de redução traduzem os efeitos de agentes de degradação. Ensaios laboratoriais e de campo, podem ser solicitados para avaliar condições específicas de projetos e estimar os valores dos referidos fatores (Vidal *et al.*, 1999; Koerner, 2005; Hufenus *et al.*, 2005; Jeon *et al.*, 2006, ISO TS 13434, 2020).

Para a análise da vida de serviço de projetos em distintos campos da Engenharia são empregadas ferramentas estatísticas, com intuito de fomentar indicadores de confiabilidade, tais como as propostas preconizadas pelas normas ASTM G166:2020 e ASTM G172:2019. Ambas trazem uma abordagem paramétrica com a distribuição de Weibull como destaque, e exigem a avaliação da aderência dos dados por meio de ensaios ou estudos prévios.

Este artigo apresenta uma nova e complementar abordagem para o dimensionamento com geossintéticos (ou qualquer outro material com características comportamentais similares). Uma metodologia não paramétrica de avaliação das probabilidades intrínsecas à durabilidade do material, dentro das condições de contorno estabelecidas em projeto, de forma a garantir a sua confiabilidade. Propõe uma técnica em que, a partir de um conjunto de dados, exploram-se os possíveis formatos da distribuição de probabilidades geradora sem impor nenhuma forma paramétrica prévia para função de densidade de probabilidade (FDP). Essa abordagem possibilita o entendimento do padrão comportamental específico do material, análises estatísticas sobre esta estimativa e a determinação da probabilidade de falha durante a vida de projeto do geossintético inserido no sistema avaliado.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A aplicação da metodologia proposta necessita de um banco de dados amostrais que contenha resultados de ensaios laboratoriais, de campo ou quaisquer outras observações que representem os parâmetros inerentes às condições de contorno impostas, que até então baseavam as estimativas sobre os fatores de redução. Ressalta-se que a metodologia ora sugerida pode ser aplicada a qualquer material que esteja exposto a solicitações que irão influenciar no desempenho deste ao longo de sua vida de serviço de projeto.

Como ferramenta para a tratativa dos dados, este estudo utilizou o *software* R (*version* 4.1.2 2021-11-01). Trata-se de um *software* livre e de código aberto para Computação Estatística. A escolha deste *software* não acarreta qualquer perda de generalidade, outros *softwares* estatísticos também podem ser utilizados para este propósito. O referido *software* dispõe de diversas bibliotecas específicas. Em particular, este estudo utilizou o pacote *lattice*, bastante adequado para procedimentos nessa abordagem.

A metodologia proposta neste artigo segue as etapas indicadas no fluxograma da Figura 3.

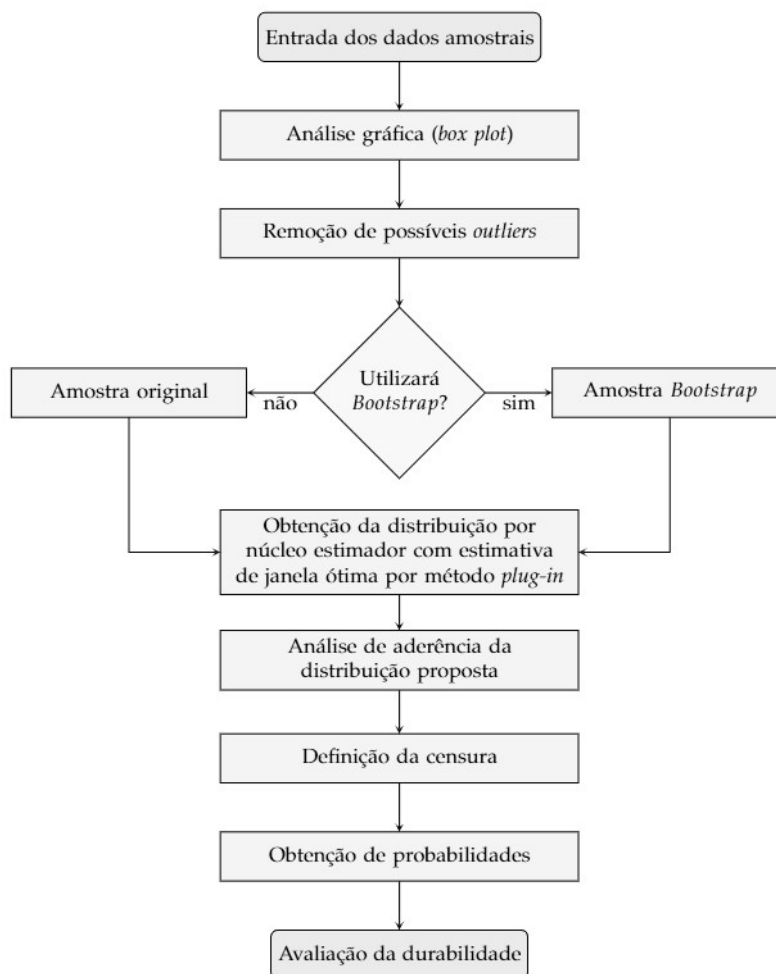


Figura 3: Fluxograma representativo da metodologia proposta.

Fonte: Da autora, 2022.

Como parte da metodologia recomenda-se para determinação da probabilidade de falha durante a vida de serviço de projeto de um material, primeiro, a construção de um gráfico do tipo *box plot*. Este gráfico possibilita a avaliação de medidas separatrizes, limites superior e inferior, a variabilidade dos dados e a ocorrência de valores atípicos (*outliers*), além de possibilitar a visualização da forma de distribuição dos dados (Schwertman *et al.*, 2004; Mirzargar *et al.*, 2014).

A remoção de valores *outliers* é bastante relevante para a determinação adequada de especificidades de comportamento da propriedade avaliada do material. Ressalta-se que este tipo de análise deve ser realizado apenas quando a variável inerente às condições de contorno estiver

diretamente relacionada com o comportamento e desempenho do material analisado. Quando esta relação não é direta, a metodologia apresentada neste artigo não é aplicável (Bruffaerts *et al.*, 2014). Além disso, a incerteza e confiabilidade das FDPs obtidas tornam-se mais críticas à medida que o número de variáveis aumenta (ASTM G166, 2000).

O critério utilizado para remoção de possíveis valores atípicos deverá ficar ao encargo do projetista, o qual deve tomar como base a sua experiência prévia com a tratativa dos dados. Ressalta-se a importância da adoção de um padrão, bem como, a manutenção deste no desenvolvimento da análise como um todo. Para avaliação sobre possíveis *outliers* multivariados, essa investigação recomenda metodologias como as descritas por Barbosa *et al.* (2020) e Duarte *et al.* (*submitted paper*).

Após uma análise descritiva dos dados, e possível remoção de valores atípicos, este artigo recomenda aplicação de métodos de reamostragem para amostras suficientemente pequenas. As técnicas baseadas em núcleos estimadores são capazes de fornecer distribuições estimadas mesmo para amostras pequenas, mas uma perda de precisão é previsível. Para estes cenários, as técnicas de reamostragem são altamente eficientes.

A reamostragem é fundamental no sentido de extrapolação do banco de dados, a fim de se modelar melhor o comportamento avaliado, já que, em termos estatísticos, uma modelagem com uma quantidade pouco significativa de amostras pode não ser representativa da população. Métodos de reamostragem possibilitam simular e aproximar uma distribuição probabilística na amostra de um levantamento estatístico. Dessa forma, este artigo, emprega o método de *Bootstrap*, que foi proposto no estudo seminal de Bradley Efron em 1979.

O *Bootstrap* é uma técnica estatística não paramétrica computacional em que amostras aleatórias com reposição são retiradas da amostra original. É um método que estima a distribuição amostral através da obtenção de diversas amostras com reposição de uma amostra aleatória única. Essas amostras repetidas são usualmente denominadas reamostras. Cada reamostra é do mesmo tamanho da amostra original. Dessa forma, a metodologia é capaz de aproximar uma distribuição de probabilidade por meio de uma função empírica obtida de uma amostra finita (Kirby e Gerlanc, 2013).

A amostragem *Bootstrap* é útil para quantificar o comportamento de uma estimativa de parâmetro, como um intervalo de confiança ou erro padrão para estatísticas que não existem fórmulas fechadas disponíveis. Na prática, o método oferece possibilidades de reformar a prática estatística - longe de estimadores simples, mas não robustos, como uma média amostral ou regressão de mínimos quadrados, em favor de alternativas robustas (Hesterberg, 2011).

O *Bootstrap* inicialmente era tratado como uma metodologia de exigência computacional elevada. O custo computacional para obtenção de algumas centenas de reamostras era demasiadamente elevado. Diante disso, foram desenvolvidos estudos para estimar o mínimo de reamostragens necessário para cobrir de forma adequada o parâmetro estudado. Por exemplo, Efron e Tibshirani, em 1993, recomendaram que o número de reamostras para um intervalo de confiança de 90% fosse superior a quinhentos ou mil, se viável. Com o desenvolvimento da tecnologia, o recurso computacional necessário para o emprego do *Bootstrap* tornou-se significativamente reduzido, o que tornou viável o emprego de número de reamostragens muito superiores aos supracitados. Isso confirma que questões de custo computacional ligado à utilização de técnica *Bootstrap* não configuram qualquer entrave para este estudo.

Nesse contexto, para a metodologia proposta, este artigo recomenda um *Bootstrap* que resulte em uma reamostragem de, no mínimo, 200 unidades. Este valor pode ser superior, a critério do projetista, o qual deve tomar como base a sua experiência prévia com a tratativa dos dados. Ressalta-se a importância da adoção de um padrão, e a manutenção deste no desenvolvimento da análise.

É importante compreender que o *Bootstrap* possui limitações quanto ao seu emprego e representatividade do resultado obtido. Suponha por exemplo que uma amostra possui número de dados insuficiente para representação do comportamento de uma população, como a reamostragem neste caso é baseada nos dados amostrais, o resultado obtido também possuirá baixa representatividade do comportamento da população. Neste contexto, deve-se avaliar a variabilidade da propriedade na área estudada.

Definida a opção por procedimento de amostragem ou não, é possível estimar uma função densidade probabilidade (FDP). Para estimar a FDP são empregados núcleos estimadores, os quais dependem diretamente da obtenção de uma janela ótima, que determina o grau de

suavização. Ressalta-se que, se a janela considerada é pequena, a FDP estimada apresentará demasiada oscilação, já se esta for muito grande, existe uma tendência de supersuavização e as características intrínsecas à FDP são distorcidas ou ocultadas. Dessa forma, são necessários critérios para encontrar a janela ótima de tal forma a minimizar estes problemas (Slaoui, 2015; Chi-Yang Chu *et al.*, 2015).

Nesse contexto, ao longo dos anos foram desenvolvidas metodologias com o objetivo de determinar a melhor forma de obtenção de uma janela ótima, minimizando medidas de acurácia. Esses métodos são baseados na ideia de que a suavização a ser realizada depende apenas dos dados. Alguns métodos de estimação de janela ótima foram desenvolvidos por Woodroffe (1970), Nadaraya (1964) e Habbema *et al.* (1974).

Neste artigo recomenda-se o emprego do método de obtenção de janela ótima *plug-in*. Essa metodologia de obtenção de janela ótima, além de outras, permite avaliar qual a melhor aderência da distribuição dos dados aos núcleos de Kernel – empregado neste artigo (Quintela-del-Río, 2007). Esses núcleos são baseados em distribuições, sendo as recomendadas para avaliação neste artigo a gaussiana, epanechnikov, retângular, triangular, biweight e cosseno.

As funções para o *software* R, utilizadas no desenvolvimento, pressupõem como *default* o emprego da metodologia de obtenção de janela ótima *plug-in*. A escolha de outras metodologias para busca de janelas ótimas pode ser incluída na metodologia sem grandes transtornos.

A avaliação da distribuição que melhor se aderiu ao banco de dados devem ocorrer a critério do projetista, o qual deve tomar como base a sua experiência prévia com a tratativa dos dados, a qual deve ser baseada no ajuste à amostra e à extrapolação além do intervalo considerado. Novamente, ressalta-se a importância da adoção de um padrão, e a manutenção deste no desenvolvimento da análise.

De posse desse procedimento, é possível obter uma FDP que melhor represente o comportamento avaliado no material em função da variável escolhida, dentro do contexto das condições de contorno às quais o material foi solicitado. Por meio da FDP é possível obter probabilidades desejadas para representar situações da variável aleatória em questão. Ressalta-se que, para determinar a probabilidade de interesse, no projeto deve constar a censura. A censura é definida como o percentual da propriedade disponível inicial de serviço, que ao longo da vida de serviço

de projeto varia em função da degradação. Os percentuais de propriedades de desempenho do geossintético devem ser estabelecidos em função do fator de segurança constituído em projeto. Visto que, no momento que a propriedade disponível for igual a requerida a probabilidade de falha é igual a 1 (ISO TS 13434, 2020).

Com a obtenção das probabilidades é possível aplicar outras ferramentas, teoremas ou metodologias estatísticas que empregam tais valores, como por exemplo, a tratativa dos eventos como independentes ou o teorema de Bayes, a depender da análise desejada e das compilações de dados possíveis.

Caso os eventos aleatórios avaliados, aqui designados por A e B sejam independentes, a ocorrência do evento A não interfere na ocorrência do evento B, assim a probabilidade de A e B ocorrerem, ou seja $(A \cap B)$, pode ser descrita pela Equação (1).

$$P(A \cap B) = P(A) \times P(B) \quad (1)$$

O teorema de Bayes é um resultado clássico que determina uma associação entre as probabilidades condicionais $P(A|B)$ (probabilidade do evento A ocorrer dado que o evento B já ocorreu) e $P(B|A)$ (probabilidade do evento B ocorrer dado que o evento A já ocorreu), representado por:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(B)} \quad (2)$$

Visto de outra forma, o conhecimento da probabilidade condicional $P(B|A)$ e das probabilidades $P(A)$ (probabilidade do evento A ocorrer) e $P(B)$ (probabilidade do evento A ocorrer) é possível determinar $P(B|A)$.

De uma forma mais clara, suponha que um geotêxtil será instalado como reforço, por meio do envelopamento do solo. O evento A representa a perda de resistência à tração ao longo da vida útil prevista em projeto devido a exposição às intempéries e B um evento que represente perda de resistência à tração devido a danos de instalação.

Para determinar a perda de resistência à tração ao longo da vida útil prevista em projeto por exposição aos agentes de intemperismo dado que danos de instalação ocorreram $P(A|B)$, é preciso

avaliar a probabilidade de ocorrer o evento A, ou seja, $P(A)$, a probabilidade de ocorrer o evento B, ou seja, $P(B)$, e ainda, a probabilidade do evento B ocorrer dado que o evento A já ocorreu, ou seja, $P(B|A)$. Para avaliação da $P(B|A)$, ensaios que submetam as amostras de teste a condições de intemperismo devem ser executados, e posteriormente submeter estas amostras às cargas impostas pela instalação, para a obtenção do banco de dados representativo da situação imposta. Assim, todas as probabilidades serão avaliadas por meio de resultados de ensaios que representem as condições especificadas em projeto, por meio da metodologia proposta neste trabalho de pesquisa. A análise também poderia ser feita por meio de banco de dados de experiências pregressas.

No contexto da análise de durabilidade de geossintéticos, é possível avaliar a sua probabilidade de falha durante a vida de projeto. A investigação deve considerar as condições de contorno as quais pode estar exposto, em complemento à metodologia que emprega fatores de redução para agregar maior confiabilidade aos projetos.

A seguir, é mostrada uma aplicação da metodologia proposta, no contexto da durabilidade de geossintéticos. O banco de dados trabalhado foi resultante de exposições em campo de geotêxtil tecido de polipropileno, um tipo de geossintético, realizadas em pesquisas pregressas. O material possuía propriedade disponível inicial de serviço de, aproximadamente, 56 kN/m (resistência à tração faixa estreita) com intervalo de confiança de $\pm 1,2$ (Urashima *et al.*, 2020).

2.3 EXEMPLO DE EMPREGO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para exemplificar, foi empregado um banco de dados relativo à resistência à tração retida de geotêxteis tecidos de polipropileno, após exposição a intempéries, por meio de pórticos de aço galvanizado com telas metálicas de bitola de 16 mm e abertura de 13 mm (ISO, 2009a) que foram instalados no Município de Varginha, estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil (Latitude: 21° 33' 05'' S, altitude: 980 m), voltados para o equador (ISO, 2009a) e distantes de elementos que provocam sombra (ISO, 2009b).]

Os pórticos possuíam inclinação de 22° com a horizontal, e aproximavam-se da latitude do local. Optou-se por seguir a recomendação da norma ISO 877-2 (ISO, 2009b). Além disso, os pórticos estavam a 0,5 m de altura em relação ao solo gramado (ISO, 2009b). A Figura 4 apresenta os pórticos de exposição.



Figura 4: Pórticos de exposição.

Fonte: Urashima *et al.*, 2020.

A variável aleatória avaliada pela metodologia explanada neste artigo foi a resistência à tração retida do geotêxtil exposto às intempéries, num ciclo que se iniciou no dia 21 de dezembro de 2016 (começo do verão) e encerrou-se dia 20 de dezembro de 2017 (fim da primavera). Foi possível avaliar por meio da metodologia apresentada o desempenho do material durante períodos de exposição, devido a distintas condições climáticas de cada estação, principalmente radiação ultravioleta (UV), precipitação e temperatura (Quadro 1).

Quadro 1: Características climáticas das estações.

Estação	Início	Final	Radiação UV (MJ/m ²)*	Precipitação (mm)	Temperatura média (°C)
Verão	21/12/2016	20/03/2017	135,62	342,40	22,75
Outono	20/03/2017	21/07/2017	69,92	165,40	19,16
Inverno	21/07/2017	22/09/2017	130,70	17,80	17,86
Primavera	22/09/2017	21/12/2017	115,31	545,80	21,42
V+O+I+P	21/12/2016	21/12/2017	451,55	1.071,40	20,30

*7,5 % da radiação global (EN 13362 (2018) assume como estimativa de radiação ultravioleta incidente uma faixa de 6% a 9% (média de 7,5%) relativa à radiação global total).

Fonte: Da autora, 2022.

É importante ressaltar a diferença dos valores de precipitação e radiação observada entre as estações climáticas. Por meio do Quadro 1 foi possível identificar um verão com precipitação e um inverno com menor índice pluviométrico. Tal fato ocorre devido às características climáticas e

geomorfológicas da região sudeste do Brasil, com tipo climático predominante tropical e topografia acidentada. Outro ponto a ser notado é que durante o outono e o inverno, para ambos os ciclos de exposição, predominou-se dias com pouca chuva, assim observou-se a formação de uma camada protetora de poeira nos materiais expostos (Figura 5).



Figura 5: Camada de poeira formada na superfície do material exposto.

Para a realização dos ensaios de exposição em campo foi necessário, para a primeira estação climática de exposição, seis corpos de prova com dimensões superficiais de 110 x 450 mm. Ao final de cada estação, uma amostra era retirada e outra colocada em seu lugar, assim, ao final, obteve-se amostras expostas de forma individual em cada estação climática e amostras expostas de forma acumulada à duas, três e quatro estações climáticas.

Para avaliar a durabilidade dos geotêxteis expostos, foram realizados ensaios de resistência à tração faixa estreita, após cada período de exposição pré-determinado em projeto. Após a retirada da amostra exposta os corpos de provas foram extraídos e submetidos a ensaios de tração conforme D5035 (ASTM, 2019). A Figura 6 mostra a plotagem dos valores de resistência retida obtidos em gráficos *boxplot*, para as estações climáticas isoladas, já a análise relativa ao tempo total de exposição é apresentada a frente. Nesta figura foi realizada a remoção de *outliers* identificados. Maiores informações sobre os ensaios de avaliação da durabilidade dos geotêxteis expostos podem ser encontradas em Urashima *et al.*, 2020.

Após a execução da etapa de retirada de possíveis *outliers*, conforme indicado no fluxograma da metodologia proposta (Figura 3), realizou-se a reamostragem por técnica *Bootstrap*, considerando $n=200$. Na sequência, aplicou-se a metodologia de núcleos estimadores no banco de dados com reamostragem e nos dados originais. Cada avaliação forneceu uma FDP distinta.

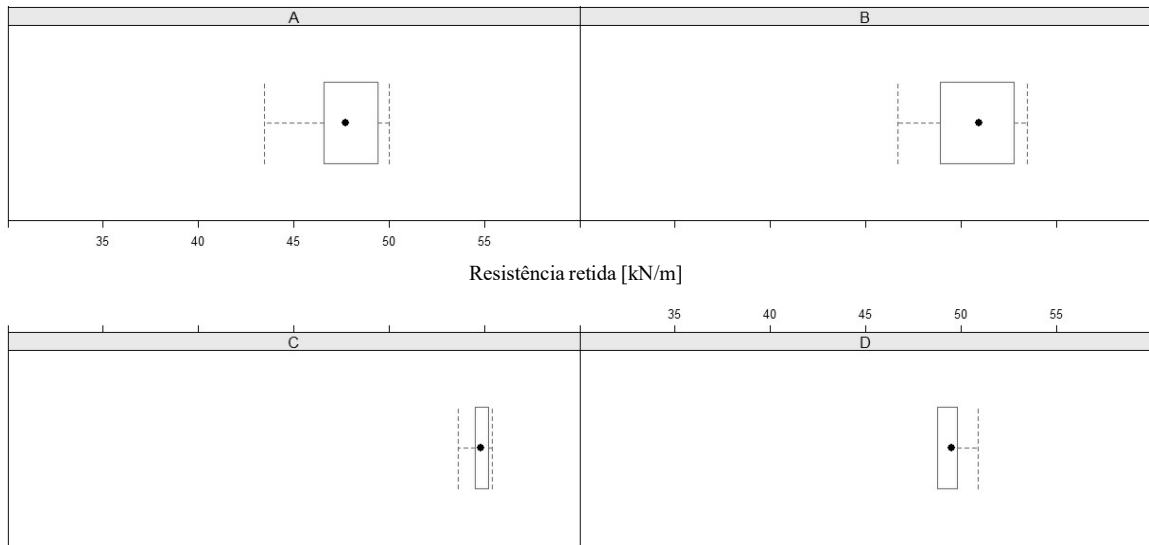


Figura 6: Resistência retida por período de exposição: A) Verão; B) Outono; C) Inverno; D) Primavera.

Fonte: Da autora, 2022.

Foram testadas para o banco de dados as distribuições indicadas na metodologia (gaussiana, *epanechnikov*, retângular, triangular, *biweight* e cosseno). Dentre as FDP obtidas, a distribuição que melhor se ajustou para o banco de dados analisado foi por meio do núcleo gaussiano.

A Figura 7 apresenta a FDP obtida para o banco de dados com reamostragem com núcleo gaussiano, já a Figura 8 apresenta a FDP obtida para o banco de dados sem reamostragem também com núcleo gaussiano.

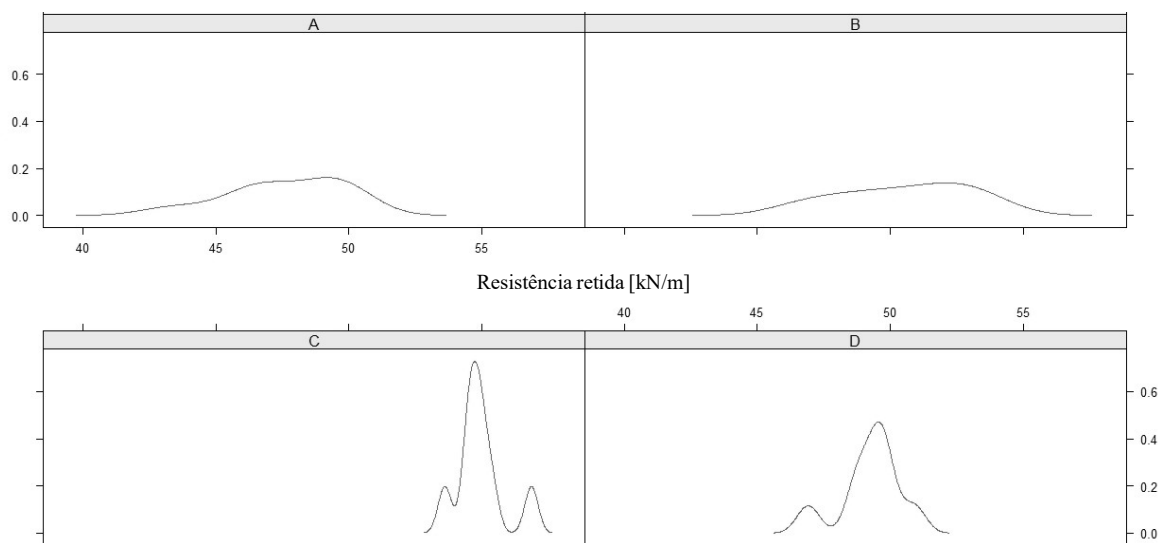


Figura 7: FDP por Kernel (gaussiana) em banco de dados sem reamostragem: A) Verão; B) Outono; C) Inverno; D) Primavera.

Fonte: Da autora, 2022.

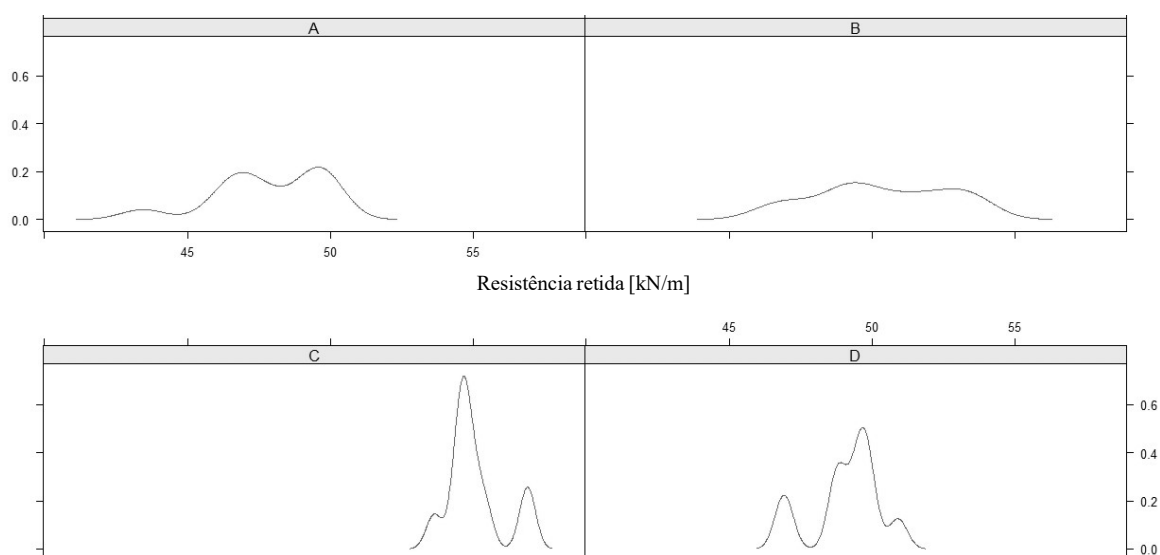


Figura 8: FDP por Kernel (gaussiana) em banco de dados com reamostragem: A) Verão; B) Outono; C) Inverno; D) Primavera.

Fonte: Da autora, 2022.

Por meio da Figura 9 foi possível identificar que a análise da durabilidade do geotêxtil frente aos fatores intempéricos aos quais as isoladas estações climáticas (verão, outono, inverno e primavera) estão sujeitas, ao ser considerado a propriedade de desempenho resistência à tração, obtém-se FDPs distintas, conseqüentemente, probabilidades de diferentes magnitudes, se comparado com a FDP obtida por meio dos dados relativos às amostras expostas em 365 dias, que equivale a todas as estações climáticas do ano em estudo, tal qual esperado.

Com as FDPs (Figura 7 e Figura 9), foi possível obter as probabilidades inerentes ao comportamento do geotêxtil tecido de polipropileno exposto às intempéries em distintos ciclos de exposição. Foram avaliadas as probabilidades da resistência do material ser superior às censuras de 50, 60, 70 e 80% (R= propriedade disponível inicial de serviço).

O Quadro 2 apresenta as probabilidades para as estações climáticas individuais para as censuras de 50, 60, 70 e 80% da resistência disponível inicial de serviço, nele, é mostrado as porcentagens de resistência à tração retida após a exposição em campo do geotêxtil (dados base para a obtenção da FDP). O Quadro 3 apresenta as probabilidades comparadas entre a FDP obtida por meio do somatório das resistências à tração das amostras expostas individualmente a cada estação climática e a FDP obtida por meio das resistências à tração das amostras expostas ao tempo total (365 dias), equivalente às quatro estações climáticas.

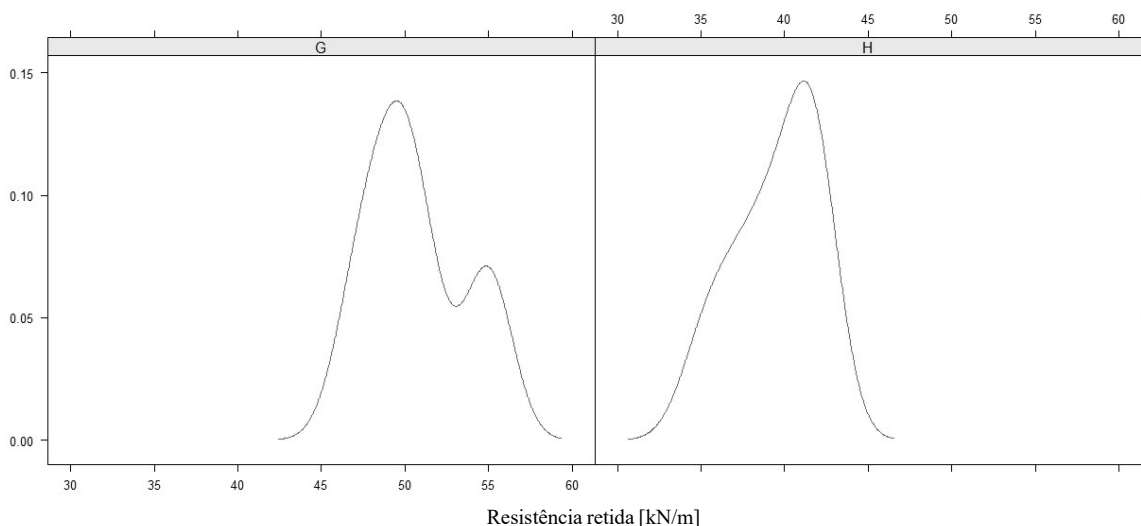


Figura 9: FDP por Kernel (gaussiana) em banco de dados sem reamostragem: G) Verão+Outono+Inverno+Primavera; H) Tempo total de exposição (365 dias).

Fonte: Da autora, 2022.

No Quadro 3, observa-se a diferença entre os valores de probabilidades obtidas por meio das diferentes FDPs. Ao se considerar $P(X > 0,7R)$ e $P(X > 0,8R)$, percebe-se a redução da probabilidade de se obter o parâmetro de desempenho considerado devido às ações de degradação intempéricas de uma estação climática prévia que potencializa as ações de degradação intempéricas da estação seguinte. É importante que ao se realizar o dimensionamento do material, tal efeito seja considerado, a fim de se minimizar diferenças significativas entre o efeito das

solicitações sobre os parâmetros de desempenho considerados em projeto.

É possível observar que as probabilidades para o verão, tanto nos dados amostrais, quanto naqueles do procedimento de reamostragem, são menores se comparadas com aquelas das demais estações climáticas, fato condizente com as características climáticas intensas identificadas no Quadro 1. Ressalta-se que no outono os dados amostrais para a probabilidade $P(X > 0,8R)$ são obtidos valores 100%, porém, para os dados de reamostragem, esse valor passou a ser 99,30%, possivelmente o tamanho amostral não foi capaz de captar pequenas variações que o aumento amostral por meio de técnica de reamostragem foi capaz de captar.

Quadro 2: Probabilidades para as distintas condições de exposição.

Resistência retida em campo (%)	Valores das probidades pelas FDP	Dados amostrais	Dados ajustados por <i>Bootstrap</i>
Verão (V)	Verão (V)	Radiação UV = 135,62 (MJ/m ²) e Precipitação = 342,40 mm	
84,28	P (X > 0,5R)	100%	100%
	P (X > 0,6R)	100%	100%
	P (X > 0,7R)	100%	100%
	P (X > 0,8R)	88,89%	90,66%
Outono (O)	Outono (O)	Radiação UV = 69,92 (MJ/m ²) e Precipitação = 165,40 mm	
89,41	P (X > 0,5R)	100%	100%
	P (X > 0,6R)	100%	100%
	P (X > 0,7R)	100%	100%
	P (X > 0,8R)	100%	99,30%
Inverno (I)	Inverno (I)	Radiação UV = 130,70 (MJ/m ²) e Precipitação = 17,80 mm	
97,64	P (X > 0,5R)	100%	100%
	P (X > 0,6R)	100%	100%
	P (X > 0,7R)	100%	100%
	P (X > 0,8R)	100%	100%
Primavera (P)	Primavera (P)	Radiação UV = 115,31 (MJ/m ²) e Precipitação = 545,80 mm	
85,78	P (X > 0,5R)	100%	100%
	P (X > 0,6R)	100%	100%
	P (X > 0,7R)	100%	100%
	P (X > 0,8R)	100%	100%
Total (V+O+I+P)	Total (V+O+I+P)	Radiação UV = 451,55 (MJ/m ²) e Precipitação = 1.071,40 mm	
76,83	P (X > 0,5R)	100%	100%
	P (X > 0,6R)	100%	98,16%
	P (X > 0,7R)	55,56%	53,47%
	P (X > 0,8R)	0,00%	0,08%

Fonte: Da autora, 2022.

Quadro 3: Probabilidades das resistências à tração das amostras expostas às estações climáticas: somatório dos efeitos e exposição total.

Valores das probidades pelas FDP	Dados amostrais
Somatório¹	Radiação UV = 451,55 (MJ/m ²) e Precipitação = 1071,40 mm
P (X > 0,5R)	100%
P (X > 0,6R)	100%
P (X > 0,7R)	100%
P (X > 0,8R)	100%
Exposição total	Radiação UV = 451,55 (MJ/m ²) e Precipitação = 1071,40 mm
P (X > 0,5R)	100%
P (X > 0,6R)	100%
P (X > 0,7R)	55,56%
P (X > 0,8R)	0,00%

¹Verão + Outono + Inverno + Primavera.

Fonte: Da autora, 2022.

Por fim, para o tempo total, como o material esteve exposto a todas as solicitações intempéricas do período, era esperado que as probabilidades obtidas fossem menores que aquelas observadas nas estações climáticas de forma isolada, tal qual apresentado.

O Anexo A apresenta a rotina empregada nesta pesquisa para a aplicação da metodologia proposta.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os geossintéticos são produtos de matriz polimérica empregados nas últimas décadas em obras de Engenharia, tais como geotécnicas, ambientais e de mineração. Este artigo apresenta uma nova abordagem para o dimensionamento com geossintéticos (ou qualquer outro material com características comportamentais similares), por meio de estatística não paramétrica para determinação das probabilidades de falha intrínsecas aos problemas de degradação, com base na função geossintética pretendida ou propriedade de desempenho, dentro das condições de contorno estabelecidas em projeto, de forma a garantir a sua confiabilidade. Propõe-se o emprego do *software* R para aplicação da metodologia, sendo apresentado um estudo de caso.

A metodologia empregada no dimensionamento de geossintéticos atualmente considera a utilização de fatores de redução para a estimativa do comportamento do material exposto às variáveis que afetam a sua durabilidade ao longo da vida de serviço de projeto. De forma complementar, há a sugestão do emprego de métodos paramétricos para estimativa de uma distribuição de probabilidade que represente este comportamento. A metodologia proposta trata-se de uma estatística não paramétrica de avaliação das probabilidades das propriedades de desempenho intrínsecas à durabilidade do material, é possível de ser aplicada em situações em que a variável aleatória considerada não segue uma distribuição conhecida e/ou o tamanho da amostra é relativamente pequeno.

A fim de se viabilizar o cálculo das probabilidades, definiu-se o termo censura como o percentual da propriedade disponível inicial de serviço, que ao longo da vida de serviço de projeto varia em função da degradação. A definição da censura pelo projetista deve nortear o cálculo das probabilidades aceitáveis para que não ocorra a falha ao longo da vida útil prevista no dimensionamento do geossintético. Ressalta-se que se a propriedade disponível for igual a requerida a probabilidade de falha é igual a 1.

No estudo de caso, a variável aleatória tratada foi a resistência à tração retida do geotêxtil exposto às intempéries, num ciclo de um ano, abordando os fatores intempéricos inerentes às estações climáticas verão, outono, inverno e primavera. Foi possível avaliar por meio da metodologia proposta o desempenho do material frente aos agentes de degradação intempéricos dos períodos de exposição. Os valores de probabilidades obtidos refletem que a metodologia proposta parece

ser promissora. Além disso, o estudo de caso possibilitou diferenciar a somatória de efeitos degradantes e a exposição total: para probabilidade da variável aleatória X ser maior que 70% da resistência à tração disponível inicial de serviço, ou seja, $P(X > 0,7R)$, foram encontrados valores de probabilidades de 1,00 (somatório) e 0,56 (exposição total).

Considerando o valor de probabilidade obtido para $P(X > 0,7R)$ e a dinâmica atmosférica envolvida ao longo do tempo de exposição, ressalta-se que o somatório de perdas de resistência à tração dos períodos isolados não pode ser considerado equivalente a perda de resistência para o período total de exposição, visto que, ações de degradação intempéricas de uma estação climática prévia potencializa as ações de degradação intempéricas da estação seguinte.

Determinado as probabilidades de desempenho, é viável avaliar os efeitos de fatores de degradação na determinação da probabilidade de falha antes do término da vida útil prevista em projeto por meio do emprego do teorema de Bayes, que permite a associação de probabilidades condicionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), HUESKER Ltda., assim como a FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo suporte financeiro.

CAPÍTULO 3

3 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os geossintéticos são produtos de matriz polimérica que, nas últimas décadas, tem ganhado mercado em obras de Engenharia, tais como geotécnicas, ambientais e de mineração, como uma alternativa de inovação tecnológica em sintonia com a Agenda 2030, visto que, em diferentes âmbitos, podem apresentar menores impactos e custos, se comparado com alternativas convencionais. Esta dissertação apresenta uma nova abordagem para o dimensionamento com geossintéticos, por meio do emprego de estatística não paramétrica de avaliação das probabilidades das variáveis aleatórias que representam parâmetros intrínsecos à durabilidade do material, dentro das condições de contorno estabelecidas em projeto, de forma a garantir a sua confiabilidade. Propõe-se o emprego do *software* R para aplicação da metodologia, sendo apresentado um estudo de caso.

A metodologia empregada no dimensionamento de geossintéticos atualmente considera a utilização de fatores de redução para a estimativa do comportamento do material exposto às variáveis que afetam a sua durabilidade ao longo da vida de serviço de projeto. De forma complementar, há a sugestão do emprego de métodos paramétricos para estimativa de uma distribuição de probabilidade que represente este comportamento.

A dissertação apresenta uma proposta metodológica com o emprego de estatística não paramétrica para a determinação das probabilidades das propriedades de desempenho intrínsecas à durabilidade do material. Dessa forma, pode ser aplicada em situações em que a variável aleatória considerada não segue uma distribuição paramétrica conhecida e/ou o tamanho da amostra é relativamente pequeno.

Foi desenvolvida uma rotina computacional com o emprego do *software* R (*version* 4.1.2 2021-11-01), visto que este *software* não acarreta em qualquer perda de generalidade em relação a outros *softwares* estatísticos, possui diversas bibliotecas específicas para o tratamento estatístico não paramétrico, tal como o pacote *lattice*, adequado para a elaboração de gráficos, de tal forma a

permitir a análise do formato de funções densidade de probabilidade específicas para os valores atribuídos às variáveis aleatórias em estudo.

Para se viabilizar o cálculo das probabilidades, definiu-se o termo censura como o percentual da propriedade disponível inicial de serviço, que ao longo da vida de serviço de projeto varia em função da degradação. A definição da censura pelo projetista deve nortear o cálculo das probabilidades aceitáveis para que não ocorra a falha ao longo da vida útil prevista no dimensionamento do geossintético. Ressalta-se que se a propriedade disponível for igual a requerida a probabilidade de falha é igual a 1.

No estudo de caso apresentado, a variável aleatória tratada foi a resistência à tração retida do geotêxtil exposto às intempéries, num ciclo de um ano, abordando os fatores intempéricos inerentes às estações climáticas verão, outono, inverno e primavera. Foi possível avaliar por meio da metodologia proposta o desempenho do material frente aos agentes de degradação intempéricos dos períodos de exposição. Os valores de probabilidades obtidos refletem que a metodologia proposta parece ser promissora. Além disso, o estudo de caso possibilitou diferenciar a somatória de efeitos degradantes e a exposição total: para probabilidade da variável aleatória X ser maior que 70% da resistência à tração disponível inicial de serviço, ou seja, $P(X > 0,7R)$, foram encontrados valores de probabilidades de 1,00 (somatório) e 0,56 (exposição total).

Considerando o valor de probabilidade obtido para $P(X > 0,7R)$ e a dinâmica atmosférica envolvida ao longo do tempo de exposição, ressalta-se que o somatório de perdas de resistência à tração dos períodos isolados não pode ser considerado equivalente a perda de resistência para o período total de exposição, visto que, ações de degradação intempéricas de uma estação climática prévia potencializa as ações de degradação intempéricas da estação seguinte.

Com o objetivo de aprimorar a pesquisa desenvolvida, propõe-se como sugestão de trabalhos futuros a aplicação e validação da metodologia proposta em geossintéticos com distintas matrizes poliméricas, a fim de se realizar tratativas mais específicas relacionadas com as propriedades de desempenho relevantes às funções principais projetadas, bem como às condições de solicitação ao longo da vida de serviço de projeto. Além disso, explorar por meio dos resultados de ensaios direcionados a análise da aplicação da inferência do teorema de Bayes na durabilidade dos geossintéticos.

Por fim, propõe-se o desenvolvimento de uma interface que permita minimizar a complexidade da aplicação da metodologia proposta, com o emprego de ícones e caixas de diálogos para maior interação com o usuário.

REFERÊNCIAS

- Allen, S.R. 2016. Geotextile durability. In: Geotextiles from Design to Applications. Woodhead Publishing Series in Textiles: Number 175. Edited by R.M. Koerner. Elsevier, Cambridge, MA.
- American Society for Testing and Materials. 2000. Standard Guide for Statistical Analysis of Service Life Data. ASTM G166, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. 2021. Standard Guide for Selecting Test Methods for Experimental Evaluation of Geosynthetic Durability. ASTM D5819, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. 2019. Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method). ASTM D5035, West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials. 2019. Standard Guide for Statistical Analysis of Accelerated Service Life Data. ASTM G172, West Conshohocken, PA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. Geossintéticos Parte 1: Termos e definições. 2ª ed. ABNT NBR ISO 10318-1, Rio de Janeiro, RJ.
- Barbosa, J. J.; Duarte, A. R.; Martins, H. S. R. A performance evaluation in multivariate outliers identification methods. *Ciência e Natura*, **42** (2020): 16. doi: 10.5902/2179460X41662.
- Blond, E.; Boyle, S.; Ferrara, M.; Herlin, B.; Plusquellec, H.; Rimoldi, P.; Stark, T. 2019. Applications of geosynthetics to irrigation, drainage and agriculture. *Irrigation and Drainage*, **68**: 67-83. doi: 10.1002/ird.2300.
- Bradley, E. Métodos Bootstrap: Outro Olhar para o Jackknife. 1979. *Ana Estatista*, **7** (1): 1 - 26. doi: 10.1214/aos/1176344552.
- Bruffaerts, C.; Verardi, V.; Vermandele, C. 2014. A generalized boxplot for skewed and heavy-tailed distributions. *Statistics and Probability Letters*, **95** (2014): 110-117. doi: 10.1016/j.spl.2014.08.016.
- Cenci, D. R. 2018. Sociopolitical and Environmental Conflicts in the Brazilian Context: Before and After Rio 92, Environmental Policies and the Contribution to Latin American Geopolitics. *Revista Estudos Avanzados*, **30**: 23-49.
- Chang, I.; Lee, M.; Cho, G. 2019. Global CO2 Emission-Related Geotechnical Engineering Hazards and the Mission for Sustainable Geotechnical Engineering. *Energies*, **12** (13): 1-21.
- Chi-Yang Chu; Henderson, D. J.; Parmeter, C. F. 2015. Plug-in Bandwidth Selection for Kernel Density Estimation with Discrete Data. *Econometrics*, **3**: 199-214. doi:10.3390/econometrics3020199.
- Duarte, A. R.; Barbosa, J. J.; Helgem, S. R. M.; Oliveira, F. L. P. Data-driven cluster analysis method: a novel outliers detection method in multivariate data (submitted paper).

- Dixon, N.; Fowmes, G.; Frost, M. 2017. Global challenges, geosynthetic solutions and counting carbon. *Geosynthetics International*, **24** (5): 451-464. doi: 10.1680/jgein.17.00014.
- Efron, B.; Tibshirani, R. J. *An Introduction to the bootstrap*. 1993. Chapman & Hall, Nova Iorque.
- Habbema, J. D. F.; Hermans, J.; Van Der Brug, A. T. 1974. A stepwise discriminant analysis program using density estimation. Bruckmann, G., editor, COMPSTAT: 101-110, Wien. Physica Verlag.
- Hesterberg, T. 2011. *Bootstrap*. John Wiley & Sons, Inc. *WIREs Comp Stat*, **3** (2011): 497-526. doi: 10.1002/wics.182.
- Hufenus, R.; Rügger, R.; Flum, D.; Sterba, I. J. 2005. Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, **23** (2005): 401-424. doi:10.1016/j.geotexmem.2005.02.003.
- International Organization for Standardization. 2020. *Geosynthetics — Guidelines for the assessment of durability*. ISO TS 13434, Switzerland.
- International Organization for Standardization. 2007. *Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement*. ISO TR 20432, Switzerland.
- International Organization for Standardization. 2009a. *Plastics – Methods of exposure to solar radiation – Part 1: General guidance*. ISO 877-1, Switzerland.
- International Organization for Standardization. 2009b. *Plastics - Methods of exposure to solar radiation – Part 2: Direct weathering and exposure behind window glass*. ISO 877-2, Switzerland.
- Jahan, I.; Wood, M.; Lake, C. B.; Gagnon, G. A. 2018. Using a geotextile with flocculated filter backwash water and its impact on aluminium concentrations. *Geotextiles and Geomembranes*, **46** (2018): 759-769. doi: 10.1016/j.geotexmem.2018.07.008.
- Jeon, H. Y.; Kim, S. H.; Lyoo, W. S.; Yoo, C.; Koerner, G. R. 2006. Evaluation of the long-term performance of geosynthetic reinforcements from their reduction factors. *Polymer Testing*, **25** (2006): 289–295. doi:10.1016/j.polymertesting.2006.01.005.
- Kirby, K. N.; Gerlanc, D. 2013. BootES: An R package for bootstrap confidence intervals on effect sizes. *Behav Res*, **45** (2013): 905–927. doi 10.3758/s13428-013-0330-5.
- Koerner, R. M. 2005. *Design with geosynthetics*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Koerner, R. M.; Hsuan, Y. G.; Koerner, G. R. Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*, **24** (2016): 1-15. doi: 10.1680/jgein.16.00026.
- Lamont-Black, J.; Jones, C.J.F.P; Alder, D. 2016. Electrokinetic strengthening of slopes - Case history . *Geotextiles and Geomembranes*, **44** (2016): 319-331. doi: 10.1016/j.geotexmem.2016.01.001.

Lange, K.; Rowe, R. K.; Jamieson, H. 2010. The potential role of geosynthetic clay liners in mine water treatment systems. *Geotextiles and Geomembranes*, **28** (2010): 199-205. doi: 10.1016/j.geotextmem.2009.10.003.

Le Blanc, D. 2015. Towards Integration at Last? The Sustainable Development Goals as a Network of Targets. *Sustainable Development*, 23: 176-187. doi: 10.1002/sd.1582.

Leite, A. C. C.; Aalves, E. E. C.; Picchi, L. 2020. The multilateral climate cooperation and the promotion of the energy transition agenda in Brazil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, **54** (2020): 379-403. doi: 10.5380/dma.v54i0.70349.

Lim, M. M. L.; Jorgensen, P. S.; Wyborn, C. A. 2018. Reframing the sustainable development goals to achieve sustainable development in the Anthropocene—a systems approach. *Ecology and Society*, **23** (3): 1-19. doi: 10.5751/ES-10182-230322.

Lopes, M. P.; Lopes, M. L. 2010. A durabilidade dos geossintéticos. FEUP Edições, Porto.

Marg, L. B. S. 2012. Handbook of geotextiles. The Bombay Textile Research Association, Mumbai.

Mirzargar, .M; Whitaker, R. T.; Kirby, R. M. 2014. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **20** (12): 2654-2663. doi: 10.1109/TVCG.2014.2346455.

Mounes, S. M.; Karim, M. R.; Khodaii, A.; Almasi, M. H. 2014. Improving Rutting Resistance of Pavement Structures Using Geosynthetics: An Overview. *The Scientific World Journal*: 1-6. doi: 10.1155/2014/764218.

Müller, W. W.; Saathoff, F. Geosynthetics in geoenvironmental engineering. 2015. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16: 1-20. doi: 10.1088/14686996/16/3/034605.

Nadaraya, E. A. 1964. Some new estimates for distribution functions. *Theory Prob. Applic.*, **9**: 497–500.

Pinto, G. E.; Pires, A.; Georges, M. R. R. 2020. Anthropocene and climate change: the perception and awareness of Brazilians according to the IBOPE survey. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, **54** (2020): 1-25. doi: 10.5380/dma.v54i0.67833.

Quintela-del-Río, A. 2007. Plug-in bandwidth selection in kernel hazard estimation from dependent data. *Computational Statistics & Data Analysis*, **51** (2007): 5800 – 5812. doi:10.1016/j.csda.2006.10.010.

Rahimi, H.; Abbasi, N.; Shantia, H. 2011. Application of geomembrane to control piping of sandy soil underconcrete canal lining (case study: Moghan irrigation project, Iran). *Irrigation and Drainage*, 60: 330-337. doi: 10.1002/ird.574.

Sarsby, R. W. 2007. Geosynthetics in civil engineering. Cambridge.

Schussel, Z. DA. G. L. 2004. Sustainable urban development – a possible utopia?.

Desenvolvimento e Meio Ambiente, **9** (2004): 57-67.

Schwertman, N. C.; Owens, M. A.; Adnan, R. 2004. A simple more general boxplot method for identifying outliers. *Computational Statistics & Data Analysis*, **47** (2004): 165 – 174. doi:10.1016/j.csda.2003.10.012.

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

Shukla, S. K.; Yin, J. 2006. *Fundamentals of geosynthetic engineering*. Taylor & Francis Group, Londres.

Slaoui, Y. 2015. Plug-in bandwidth selector for recursive kernel regression estimators defined by stochastic approximation method. *Statistica Neerlandica*, **69** (4): 483–509. doi:10.1111/stan.1206.

Souza, M. C. O; Corazza, R. I. 2017. From Kyoto Protocol to Paris Agreement: An Analysis of Global Climate Regime Changes Based on a Study of the Evolution of Green Gases Emissions Profiles. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, **42** (2017): 52-80. doi: 10.5380/dma.v42i0.51298.

Touze, N. 2021. Healing the world: a geosynthetics solution. *Geosynthetics International*, **28** (1): 1-31. doi: 10.1680/jgein.20.00023.

Urashima, B. M. C.; Urashima, D. DE C.; Castro, C. A. C.; Guimarães, M. G. A. 2020. Degradação de Geotêxteis Expostos às Intempéries. *Brazilian Journal of Development*, **6** (2020): 25208-25219. doi:10.34117/bjdv6n5-103.

Vidal, D.; Fabrin, T.; Montez, F. 1999. O conceito de fatores de redução aplicados as propriedades dos geossintéticos. In: *Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, 3.*, 1999, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: *Simpósio Brasileiro de Geossintéticos*, 1999.pp. 189-198.

Woodroffe, M. 1970. On choosing a Delta-sequence. *Annals of Mathematical Statistics*, **41**: 1671-1965.

APÊNDICES

APÊNDICE A

R version 4.1.2 (2021-11-01) -- "Bird Hippie"

Copyright (C) 2021 The R Foundation for Statistical Computing

Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit)

```
> library(lattice)
```

```
> library(RColorBrewer)
```

```
> dados3 <- read.table(file="Dados R3.csv", header=T, sep=";")
```

```
#Plotar primeiro boxplot com os outliers
```

```
> bwplot(~dados3[,3] | dados3[,2]+dados3[,1],xlim=c(40,60),main='Resistência por período de  
exposição',xlab='Resistência [kN/m]')
```

```
#Plotar boxplot sem os outliers
```

```
> bwplot(~dados3[,3] | dados3[,2]+dados3[,1],xlim=c(40,60),main='Resistência por período de  
exposição',xlab='Resistência [kN/m]',do.out=FALSE)
```

```
#Remoção dos outliers no banco de dados pelo autor, tomando como base o boxplot
```

```
#FDP por Kernel para banco de dados sem reamostragem, considerando distribuição gaussiana e  
plug-in
```

```
densityplot(~dados3[,3]|dados3[,2], groups=dados3[,1],kernel =  
c("gaussian"),main='Resistência por período de exposição',xlab='Resistência [kN/m]', ylab='  
,plot.points=FALSE, auto.key=TRUE)
```

```
#Reamostragem por bootstrap para n=200 (para cada ciclo)
```

```
set.seed(1234)
```

```
A_boot=dados3[1,]
```

```
for(i in 1:49) A_boot=rbind(A_boot,dados3[1,])
```

```
x=dados3$Resistencia[1:4]
```

```

y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[1:50]=y
for(i in 1:50) A_boot=rbind(A_boot,dados3[5,])
x=dados3$Resistencia[5:8]
y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[51:100]=y
for(i in 1:50) A_boot=rbind(A_boot,dados3[9,])
x=dados3$Resistencia[9:12]
y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[101:150]=y
for(i in 1:50) A_boot=rbind(A_boot,dados3[13,])
x=dados3$Resistencia[13:16]
y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[151:200]=y
for(i in 1:50) A_boot=rbind(A_boot,dados3[17,])
x=dados3$Resistencia[17:25]
y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[201:250]=y
for(i in 1:50) A_boot=rbind(A_boot,dados3[26,])
x=dados3$Resistencia[26:35]
y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[251:300]=y
for(i in 1:50) A_boot=rbind(A_boot,dados3[36,])
x=dados3$Resistencia[36:43]
y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[301:350]=y
for(i in 1:50) A_boot=rbind(A_boot,dados3[44,])
x=dados3$Resistencia[44:51]
y=sample(x, 50, replace = T)
A_boot$Resistencia[351:400]=y

```

```

densityplot(~A_boot[,3]|A_boot[,2], groups=A_boot[,1],kernel =
c("gaussian"),main='Resistência por período de exposição',xlab='Resistência [kN/m]',ylab='

```

```
',plot.points=FALSE, auto.key=TRUE)
```

```
#Encontrar as probabilidades
```

```
##Quantis
```

```
quantil_density=function(dados,p){  
  boot=density(dados,n=1000)  
  boot_x=boot$x  
  boot_y=boot$y  
  delta_x=(max(boot_x)-min(boot_x))/1000  
  q=0  
  i=1  
  while(q<p){  
    q=q+boot_y[i]*delta_x  
    i=i+1  
  }  
  i=i-1  
  return(boot_x[i])  
}
```

```
Q_estacoes=matrix(0,nrow=24,ncol=4)
```

```
Q_estacoes[1,1:4]=c(quantile(dados3$Resistencia[1:4],0.50),quantile(dados3$Resistencia[1:4],0.  
60),quantile(dados3$Resistencia[1:4],0.70),quantile(dados3$Resistencia[1:4],0.80))
```

```
Q_estacoes[2,1:4]=c(quantile(dados3$Resistencia[5:8],0.50),quantile(dados3$Resistencia[5:8],0.  
60),quantile(dados3$Resistencia[5:8],0.70),quantile(dados3$Resistencia[5:8],0.80))
```

```
Q_estacoes[3,1:4]=c(quantile(dados3$Resistencia[9:12],0.50),quantile(dados3$Resistencia[9:12],  
0.60),quantile(dados3$Resistencia[9:12],0.70),quantile(dados3$Resistencia[9:12],0.80))
```

```
Q_estacoes[4,1:4]=c(quantile(dados3$Resistencia[13:16],0.50),quantile(dados3$Resistencia[13:1  
6],0.60),quantile(dados3$Resistencia[13:16],0.70),quantile(dados3$Resistencia[13:16],0.80))
```

```
Q_estacoes[5,1:4]=c(quantile(dados3$Resistencia[17:25],0.50),quantile(dados3$Resistencia[17:2  
5],0.60),quantile(dados3$Resistencia[17:25],0.70),quantile(dados3$Resistencia[17:25],0.80))
```

```
Q_estacoes[6,1:4]=c(quantile(dados3$Resistencia[26:35],0.50),quantile(dados3$Resistencia[26:3  
5],0.60),quantile(dados3$Resistencia[26:35],0.70),quantile(dados3$Resistencia[26:35],0.80))
```

$Q_estacoes[7,1:4]=c(\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.50),\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.60),\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.70),\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.80))$

$Q_estacoes[8,1:4]=c(\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.50),\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.60),\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.70),\text{quantile}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.80))$

$Q_estacoes[9,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],0.80))$

$Q_estacoes[10,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],0.80))$

$Q_estacoes[11,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],0.80))$

$Q_estacoes[12,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],0.80))$

$Q_estacoes[13,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],0.80))$

$Q_estacoes[14,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],0.80))$

$Q_estacoes[15,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],0.80))$

$Q_estacoes[16,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.50),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.60),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.70),\text{quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],0.80))$

$Q_estacoes[17,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],0.50),\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],0.60),\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],0.70),\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],0.80))$

$Q_estacoes[18,1:4]=c(\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],0.50),\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],0.60),\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],0.70),\text{quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],0.80))$

```

_boot$Resistencia[51:100],0.80))
Q_estacoes[19,1:4]=c(quantil_density(A_boot$Resistencia[101:150],0.50),quantil_density(A_bo
ot$Resistencia[101:150],0.60),quantil_density(A_boot$Resistencia[101:150],0.70),quantil_densit
y(A_boot$Resistencia[101:150],0.80))
Q_estacoes[20,1:4]=c(quantil_density(A_boot$Resistencia[151:200],0.50),quantil_density(A_bo
ot$Resistencia[151:200],0.60),quantil_density(A_boot$Resistencia[151:200],0.70),quantil_densit
y(A_boot$Resistencia[151:200],0.80))
Q_estacoes[21,1:4]=c(quantil_density(A_boot$Resistencia[201:250],0.50),quantil_density(A_bo
ot$Resistencia[201:250],0.60),quantil_density(A_boot$Resistencia[201:250],0.70),quantil_densit
y(A_boot$Resistencia[201:250],0.80))
Q_estacoes[22,1:4]=c(quantil_density(A_boot$Resistencia[251:300],0.50),quantil_density(A_bo
ot$Resistencia[251:300],0.60),quantil_density(A_boot$Resistencia[251:300],0.70),quantil_densit
y(A_boot$Resistencia[251:300],0.80))
Q_estacoes[23,1:4]=c(quantil_density(A_boot$Resistencia[301:350],0.50),quantil_density(A_bo
ot$Resistencia[301:350],0.60),quantil_density(A_boot$Resistencia[301:350],0.70),quantil_densit
y(A_boot$Resistencia[301:350],0.80))
Q_estacoes[24,1:4]=c(quantil_density(A_boot$Resistencia[351:400],0.50),quantil_density(A_bo
ot$Resistencia[351:400],0.60),quantil_density(A_boot$Resistencia[351:400],0.70),quantil_densit
y(A_boot$Resistencia[351:400],0.80))

```

```

cat("Dados estações\n\n",
"quantis dados (inverno, primavera, verão, outono)\n",
c(0.50,0.60,0.70,0.80),"n",
Q_estacoes[1,1:4],"n",
Q_estacoes[2,1:4],"n",
Q_estacoes[3,1:4],"n",
Q_estacoes[4,1:4],"n\nn",
"quantis dados (verão, outono, inverno, primavera)\n",
c(0.50,0.60,0.70,0.80),"n",
Q_estacoes[5,1:4],"n",
Q_estacoes[6,1:4],"n",
Q_estacoes[7,1:4],"n",
Q_estacoes[8,1:4],"n\nn",

```

```

"quantis distribuição ajustada (inverno, primavera, verão, outono)\n",
c(0.50,0.60,0.70,0.80),"n",
Q_estacoes[9,1:4],"n",
Q_estacoes[10,1:4],"n",
Q_estacoes[11,1:4],"n",
Q_estacoes[12,1:4],"n\n",
"quantis distribuição ajustada (verão, outono, inverno, primavera)\n",
c(0.50,0.60,0.70,0.80),"n",
Q_estacoes[13,1:4],"n",
Q_estacoes[14,1:4],"n",
Q_estacoes[15,1:4],"n",
Q_estacoes[16,1:4],"n\n",
"quantis distribuição ajustada bootstrap (inverno, primavera, verão, outono)\n",
c(0.50,0.60,0.70,0.80),"n",
Q_estacoes[17,1:4],"n",
Q_estacoes[18,1:4],"n",
Q_estacoes[19,1:4],"n",
Q_estacoes[20,1:4],"n\n",
"quantis distribuição ajustada bootstrap (verão, outono, inverno, primavera)\n",
c(0.50,0.60,0.70,0.80),"n",
Q_estacoes[21,1:4],"n",
Q_estacoes[22,1:4],"n",
Q_estacoes[23,1:4],"n",
Q_estacoes[24,1:4],"n\n",
file = "quantiles_result.txt", sep = "\t", dec = ".")

```

```

###Inverso_Quantis

```

```

inv_quantil=function(dados,value){
  dados=sort(dados)
  i=1
  cont=0
  if(dados[i]>value) return(0.0)
  else{

```

```

while(dados[i]<=value && i<=length(dados)){
  cont=cont+1
  i=i+1
}
return(cont/length(dados))
}
}

```

```

###Inverso_Quantis

```

```

inv_quantil_density=function(dados,value){
  boot=density(dados,n=1000)
  boot_x=boot$x
  boot_y=boot$y
  delta_x=(max(boot_x)-min(boot_x))/1000
  i=1
  prob=0
  if(boot_x[i]>value) return(0.0)
  else{
    while(boot_x[i]<=value && i<=length(boot_x)){
      prob=prob+boot_y[i]*delta_x
      i=i+1
    }
    return(prob)
  }
}

```

```

Q_estacoes=matrix(0,nrow=24,ncol=4)

```

```

Q_estacoes[1,1:4]=c(1-inv_quantil(dados3$Resistencia[1:4],28.3),1-
inv_quantil(dados3$Resistencia[1:4],33.9),1-inv_quantil(dados3$Resistencia[1:4],39.6),1-
inv_quantil(dados3$Resistencia[1:4],45.2))

```

```

Q_estacoes[2,1:4]=c(1-inv_quantil(dados3$Resistencia[5:8],28.3),1-
inv_quantil(dados3$Resistencia[5:8],33.9),1-inv_quantil(dados3$Resistencia[5:8],39.6),1-

```


$\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],45.2)$
 $Q_estacoes[3,1:4]=c(1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],33.9),1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],45.2))$
 $Q_estacoes[4,1:4]=c(1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],33.9),1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],45.2))$
 $Q_estacoes[5,1:4]=c(1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],33.9),1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],45.2))$
 $Q_estacoes[6,1:4]=c(1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],33.9),1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],45.2))$
 $Q_estacoes[7,1:4]=c(1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],33.9),1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],45.2))$
 $Q_estacoes[8,1:4]=c(1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],33.9),1-\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],45.2))$
 $Q_estacoes[9,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[1:4],45.2))$
 $Q_estacoes[10,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[5:8],45.2))$
 $Q_estacoes[11,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[9:12],45.2))$
 $Q_estacoes[12,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],33.9),1-$

$\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[13:16],45.2))$
 $Q_estacoes[13,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[17:25],45.2))$
 $Q_estacoes[14,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[26:35],45.2))$
 $Q_estacoes[15,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[36:43],45.2))$
 $Q_estacoes[16,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{dados3}\$Resistencia[44:51],45.2))$
 $Q_estacoes[17,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[1:50],45.2))$
 $Q_estacoes[18,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[51:100],45.2))$
 $Q_estacoes[19,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[101:150],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[101:150],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[101:150],39.6),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[101:150],45.2))$
 $Q_estacoes[20,1:4]=c(1-\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[151:200],28.3),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[151:200],33.9),1-$
 $\text{inv_quantil_density}(\text{A_boot}\$Resistencia[151:200],39.6),1-$

```

inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[151:200],45.2))
Q_estacoes[21,1:4]=c(1-inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[201:250],28.3),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[201:250],33.9),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[201:250],39.6),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[201:250],45.2))
Q_estacoes[22,1:4]=c(1-inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[251:300],28.3),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[251:300],33.9),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[251:300],39.6),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[251:300],45.2))
Q_estacoes[23,1:4]=c(1-inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[301:350],28.3),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[301:350],33.9),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[301:350],39.6),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[301:350],45.2))
Q_estacoes[24,1:4]=c(1-inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[351:400],28.3),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[351:400],33.9),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[351:400],39.6),1-
inv_quantil_density(A_boot$Resistencia[351:400],45.2))

```

```

cat("Dados estações\n\n",
"area superior ao ponto de corte dados (inverno, primavera, verao, outono)\n",
c(28.3,33.9,39.6,45.2),"n",
Q_estacoes[1,1:4],"n",
Q_estacoes[2,1:4],"n",
Q_estacoes[3,1:4],"n",
Q_estacoes[4,1:4],"n\n",
"area superior ao ponto de corte dados (verao, outono, inverno, primavera)\n",
c(28.3,33.9,39.6,45.2),"n",
Q_estacoes[5,1:4],"n",
Q_estacoes[6,1:4],"n",
Q_estacoes[7,1:4],"n",
Q_estacoes[8,1:4],"n\n",
"area superior ao ponto de corte distribuição ajustada (inverno, primavera, verao, outono)\n",

```

```

c(28.3,33.9,39.6,45.2),"n",
Q_estacoes[9,1:4],"n",
Q_estacoes[10,1:4],"n",
Q_estacoes[11,1:4],"n",
Q_estacoes[12,1:4],"n\n",
"area superior ao ponto de corte distribuição ajustada (verao, outono, inverno, primavera)\n",
c(28.3,33.9,39.6,45.2),"n",
Q_estacoes[13,1:4],"n",
Q_estacoes[14,1:4],"n",
Q_estacoes[15,1:4],"n",
Q_estacoes[16,1:4],"n\n",
"area superior ao ponto de corte distribuição ajustada bootstrap (inverno, primavera, verao,
outono)\n",
c(28.3,33.9,39.6,45.2),"n",
Q_estacoes[17,1:4],"n",
Q_estacoes[18,1:4],"n",
Q_estacoes[19,1:4],"n",
Q_estacoes[20,1:4],"n",
"area superior ao ponto de corte distribuição ajustada bootstrap (verao, outono, inverno,
primavera)\n",
c(28.3,33.9,39.6,45.2),"n",
Q_estacoes[21,1:4],"n",
Q_estacoes[22,1:4],"n",
Q_estacoes[23,1:4],"n",
Q_estacoes[24,1:4],"n",
file = "inv_quantiles_result.txt", sep = "\t", dec = ".")

```

DECLARAÇÃO

Eu, Beatriz Mydori Carvalho Urashima, declaro que esta dissertação intitulada Metodologia para Determinação da Probabilidade de Falha Durante a Vida de Serviço de Projetos de Geossintéticos é inteiramente e exclusivamente de minha autoria e que, com exceção das citações diretas e indiretas claramente indicadas e referenciadas nesse trabalho, e do uso autorizado de banco de dados, seu texto, figuras, gráficos, quadros, tabelas, algoritmos e demais dados foram por mim obtidos e, portanto, não contêm plágio.

Assinatura:

