

**UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM  
PROCESSAMENTO DE MATERIAIS – PPGPM  
CÂMPUS URBANOVA**

**ANTÔNIO LUÍS CARDOSO NETO**

**FOTODEGRADAÇÃO DE TECIDOS DE PARAPENTES: UM ESTUDO  
INTEGRADO DE PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE**

**PHOTODEGRADATION OF PARAGLIDER FABRICS: AN INTEGRATED STUDY  
OF SURFACE PROPERTIES**

São José dos Campos

2025

**ANTÔNIO LUÍS CARDOSO NETO**

**FOTODEGRADAÇÃO DE TECIDOS DE PARAPENTES: UM ESTUDO  
INTEGRADO DE PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Processamento de Materiais, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de mestre em Processamento de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Ivone Regina de Oliveira

São José dos Campos

2025

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

### Ficha catalográfica

Cardoso Neto, Antônio Luís

Fotodegradação de tecidos de parapentes: um estudo integrado de propriedades de superfície / Antônio Luís Cardoso Neto; orientadora, Profa. Dra. Ivone Regina de Oliveira. - São José dos Campos, SP, 2025.

77 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais.

Inclui referências

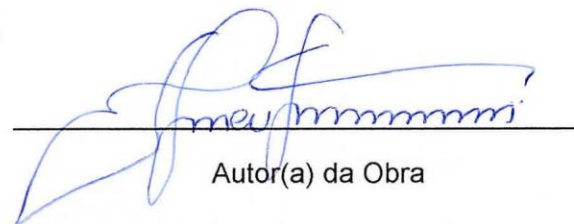
1. Processamento de Materiais. 2. Durabilidade. 3. Parapente. 4. Superfícies (Tecnologia). I. Oliveira, Profa. Dra. Ivone Regina de, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais. III. Título.

Eu, Antônio Luís Cardoso Neto, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 31 de Outubro de 2025.



\_\_\_\_\_  
Autor(a) da Obra


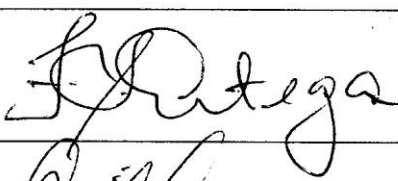
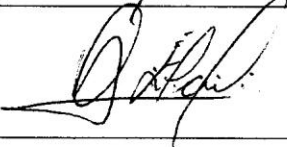
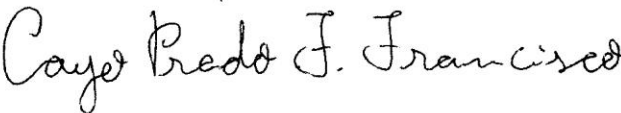
Data da defesa: 09 / 08 / 2025

---

**ANTONIO LUIS CARDOSO NETO**

**“FOTODEGRADAÇÃO DE TECIDOS DE PARAGLIDERS: UM ESTUDO INTEGRADO DE  
PROPRIEDADES DE SUPERFÍCIE.”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

|   |  |
|---|--|
| Prof.ª Dr.ª Ivone Regina de Oliveira  |   |
| Prof. Dr. Fernando dos Santos Ortega  |  |
| Élcio Jeronimo de Oliveira – KVANTUM<br>Technology & Innovation)            |  |
| Cayo Prado Fernandes Francisco – Instituto de<br>Aeronáutica e Espaço - IAE |  |

Prof.ª Dr.ª Juliana Ferreira Strixino

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 09 de agosto de 2025.

## RESUMO

Este estudo investigou a fotodegradação de tecidos de parapentes, náilon 6,6 ripstop resinados com poliuretano e silicone, expostos à radiação solar. Para isso, utilizou-se uma metodologia integrada, combinando análises físico-mecânicas (permeabilidade ao ar, resistência ao rasgo), químicas (FTIR-ATR), morfológicas (MEV) e, principalmente, propriedades de superfície (goniometria e colorimetria), para entender os efeitos do intemperismo e sua importância no desempenho funcional do tecido. Os resultados demonstraram que a coloração do tecido é crucial na degradação das propriedades de superfície e mecânicas. A permeabilidade ao ar, propriedade superficial crítica, foi a mais sensível, degradando-se rapidamente entre 300 e 400 horas, com a resistência ao rasgo gravemente comprometida. Análises químicas confirmaram alterações e quebra de cadeias poliméricas. O tecido verde exibiu desempenho superior, enquanto o vermelho mostrou degradação acentuada em 300 horas, e o branco demonstrou estabilidade espectral. A reaplicação de silicone, apesar de restaurar a hidrofobicidade superficial, foi ineficaz contra a degradação mecânica. Conclui-se que a degradação é multifatorial e ligada à composição e coloração, oferecendo subsídios vitais para o desenvolvimento de tecidos mais seguros para parapentes.

**Palavras-chave:** Fotodegradação, Tecidos técnicos, Parapentes, Propriedades de superfície, Durabilidade.

## ABSTRACT

This study investigated the photodegradation of paragliding fabrics, nylon 6.6 ripstop coated with polyurethane and silicone, exposed to solar radiation. To this end, an integrated methodology was used, combining physical-mechanical (air permeability, tear resistance), chemical (FTIR-ATR), morphological (SEM), and, mainly, surface properties (goniometry and colorimetry) analyses to understand the effects of weathering and its importance in the functional performance of the fabric. The results showed that the color of the fabric is crucial in the degradation of surface and mechanical properties. Air permeability, a critical surface property, was the most sensitive, degrading rapidly between 300 and 400 hours, with tear resistance severely compromised. Chemical analyses confirmed changes and breaks in the polymer chains. The green fabric performed better, while the red fabric showed marked degradation at 300 hours and the white fabric demonstrated spectral stability. Reapplication of silicone, although restoring the hydrophobicity of the surface, was ineffective against mechanical degradation. It is concluded that degradation is multifactorial and linked to composition and coloration, providing vital insights for the development of safer fabrics for paragliders.

**Keywords:** Photodegradation, Technical fabrics, Paragliders, Surface properties, Durability.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Elementos de um paraglider: (a) vista frontal e superior, (b) perfil da asa e (c) esquema de linhas de suspensão.....   | 12 |
| Figura 2 - Esquema de engenharia do tecido técnico: (a) imagens da trama do tecido e impregnação de resina nos filamentos de náilon e (b) esquema da seção transversal do tecido.....              | 13 |
| Figura 3 - Sítios de voos oficiais quanto potenciais para a prática do voo livre no Vale do Paraíba/SP e adjacências.....  | 14 |
| Figura 4 - Distribuição espectral da energia solar ao nível do mar (radiação global), acima da atmosfera e na superfície terrestre (ASTM G173-03). ....  | 16 |
| Figura 5 - Esquema simplificado da interação da irradiação solar com o tecido.....   | 21 |
| Figura 6 - Diagrama de Jablonski simplificado com processos fotofísicos e fotoquímicos. ...  | 22 |
| Figura 7 - Esquema da reação de formação do nylon 6,6 por policondensação. ....  | 25 |
| Figura 8 - Detalhes do sítio de exposição. ....  | 33 |
| Figura 9 - Esquema de coleta de amostras durante exposição.....  | 34 |
| Figura 10 - Equipamentos utilizados para caracterização físico-mecânica.....   | 36 |
| Figura 11 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 29 g/m <sup>2</sup> , sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição. ....                          | 42 |
| Figura 12 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 40 g/m <sup>2</sup> , sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição. ....                          | 43 |
| Figura 13 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 29 g/m <sup>2</sup> , com reaplicação de resina (CR), em função do tempo de exposição. ....                          | 44 |
| Figura 14 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 29 g/m <sup>2</sup> , com reaplicação de resina (CR), em função do tempo de exposição. ....                          | 44 |
| Figura 15 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 29 g/m <sup>2</sup> , sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.....                  | 45 |
| Figura 16 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 40 g/m <sup>2</sup> , sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.....                  | 46 |
| Figura 17 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 29 g/m <sup>2</sup> , com reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.....                  | 46 |
| Figura 18 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 40 g/m <sup>2</sup> , com reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.....                  | 47 |
| Figura 19 - Comparação dos espectros FTIR-ATR de tecidos ripstop de nylon 6,6, com revestimentos de poliuretano e silicone, por cor, antes (0 h) e após (300 h) a exposição à radiação solar. .... | 49 |
| Figura 20 - Evolução das bandas C=O-H/N-H (~1715-1740 cm <sup>-1</sup> ) após 300 horas de exposição à radiação solar. ....  | 54 |
| Figura 21 - Evolução das bandas O-H/N-H (~3300 cm <sup>-1</sup> ) e C-H (~2900 cm <sup>-1</sup> ) após 300 horas de exposição à irradiação solar.....  | 55 |
| Figura 22 - Evolução das bandas Amida I (~1630 cm <sup>-1</sup> ) e Amida II (~1550 cm <sup>-1</sup> ).....  | 56 |
| Figura 23 - Região de impressão digital (900–1400 cm <sup>-1</sup> ): bandas características de Si–O–Si e Si–CH <sub>3</sub> . ....  | 57 |
| Figura 24 - Variação do ângulo de contato da água em amostras (0h, 300h, 400h) sem reaplicação de resina de silicone.....  | 59 |
| Figura 25 - Ângulo de contato da água em amostras após 400h: comparativo entre Sem Reaplicação (SR) e Com Reaplicação (CR) de resina de silicone. ....   | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26 - Ângulo de contato ( $\theta$ ) após 400h: comparativo entre Sem Reaplicação (SR) e Com Reaplicação (CR) de resina de silicone.....                        | 60 |
| Figura 27 - Variação percentual do ângulo de contato da água (0h a 400h): comparativo entre amostras Sem Reaplicação (SR) e Com Reaplicação (CR).....                 | 61 |
| Figura 28 - Degradação estrutural de tecidos de parapente (verde e branco) por MEV em 0h e 400h de exposição solar.....   | 62 |
| Figura 29 - Micrografias da superfície de tecidos Sem (SR) e Com Reaplicação de silicone (CR) nas amostras de tecido (Verde e Branco) em 400h de exposição solar. ... | 63 |
| Figura 30 - Avaliação da alteração de cor dos tecidos: (a) variação visual ao longo do tempo; e (b) colorímetro digital. ....   | 64 |
| Figura 31 - Fotodegradação por irradiação solar de tecidos de náilon ripstop resinado, em função do tempo de exposição. ....  | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Regiões do espectro eletromagnético e seus efeitos nos materiais. ....   | 15 |
| Tabela 2 – Climatologia da irradiação solar no local de exposição .....   | 40 |
| Tabela 3 – Estatísticas dos dados meteorológicos nos períodos das exposições.....   | 41 |
| Tabela 4 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para permeabilidade ao ar e resistência ao rasgo em tecidos de nylon de diferentes cores e gramaturas. .... | 47 |
| Tabela 5 - Bandas infravermelhas características e referências. ....  | 51 |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>12</b> |
| 1.1      | O PARAPENTE: CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS .....                           | 12        |
| 1.2      | VOO LIVRE DE PARAPENTE: PERCEPÇÃO DE RISCO E SEGURANÇA ..<br>.....        | 13        |
| 1.3      | REGIÃO DO VALE DO PARAÍBA: CONTEXTO GEOGRÁFICO .....                      | 14        |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b> .....  | <b>18</b> |
| 2.1      | OBJETIVO GERAL.....   | 18        |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 18        |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....  | <b>19</b> |
| 3.1      | FOTODEGRADAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS .....                             | 19        |
| 3.1.1    | Mecanismos de absorção de energia e efeitos da radiação ultravioleta .... | 19        |
| 3.1.2    | Implicações para a durabilidade do tecido .....                           | 20        |
| 3.1.3    | Distribuição da energia solar incidente.....                              | 20        |
| 3.1.4    | Diagrama de Jablonski: processos fotofísicos e fotoquímicos.....          | 22        |
| 3.1.4.1  | <i>Estados eletrônicos e absorção de fótons</i> .....                     | 23        |
| 3.1.4.2  | <i>Processos de relaxamento e conversão</i> .....                         | 23        |
| 3.1.4.3  | <i>Reações químicas: o caminho da degradação</i> .....                    | 24        |
| 3.2      | MATERIAIS CONSTITUINTES DO TECIDO.....                                    | 25        |
| 3.2.1    | Náilon 6,6: síntese, propriedades e desafios ambientais .....             | 25        |
| 3.2.2    | Compósitos têxteis de náilon 6,6 com revestimentos de PU e PDMS.....      | 25        |
| 3.2.3    | Mecanismos e efeitos da fotodegradação .....                              | 27        |
| 3.2.3.1  | <i>Início e propagação da fotodegradação</i> .....                        | 27        |
| 3.2.3.2  | <i>Consequências da degradação e estratégias de mitigação</i> .....       | 28        |
| 3.2.4    | Estudos anteriores sobre fotodegradação de tecidos técnicos.....          | 28        |
| 3.2.4.1  | <i>Mecanismos e impactos da degradação</i> .....                          | 29        |
| 3.2.4.2  | <i>Revestimentos protetores e monitoramento</i> .....                     | 29        |
| 3.2.4.3  | <i>Variáveis da durabilidade e estratégias de mitigação</i> .....         | 30        |
| 3.3      | CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DA LITERATURA.....                        | 30        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>32</b> |
| 4.1      | AMOSTRAS DE TECIDOS RIPSTOP DE NÁILON RESINADO .....                      | 32        |
| 4.1.1    | Reaplicação de silicone em amostras de tecidos .....                      | 32        |
| 4.1.1.1  | <i>Produto Comercial Aplicado: OUTDOOR Water Shield™ (Scotchgard™)</i> .  | 32        |
| 4.1.1.2  | <i>Reaplicação de silicone: procedimento e condições ambientais</i> ..... | 32        |
| 4.2      | LOCAL E PERÍODOS DE EXPOSIÇÃO .....                                       | 33        |
| 4.3      | CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO SÍTIO DE EXPOSIÇÃO .....                  | 34        |
| 4.4      | TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO .....  | 35        |
| 4.4.1    | Caracterização físico-mecânica do tecido .....                            | 36        |
| 4.4.2    | Caracterização físico-química e morfológica do tecido .....               | 37        |
| 4.4.2.1  | <i>Espectroscopia no infravermelho (FTIR)</i> .....                       | 37        |

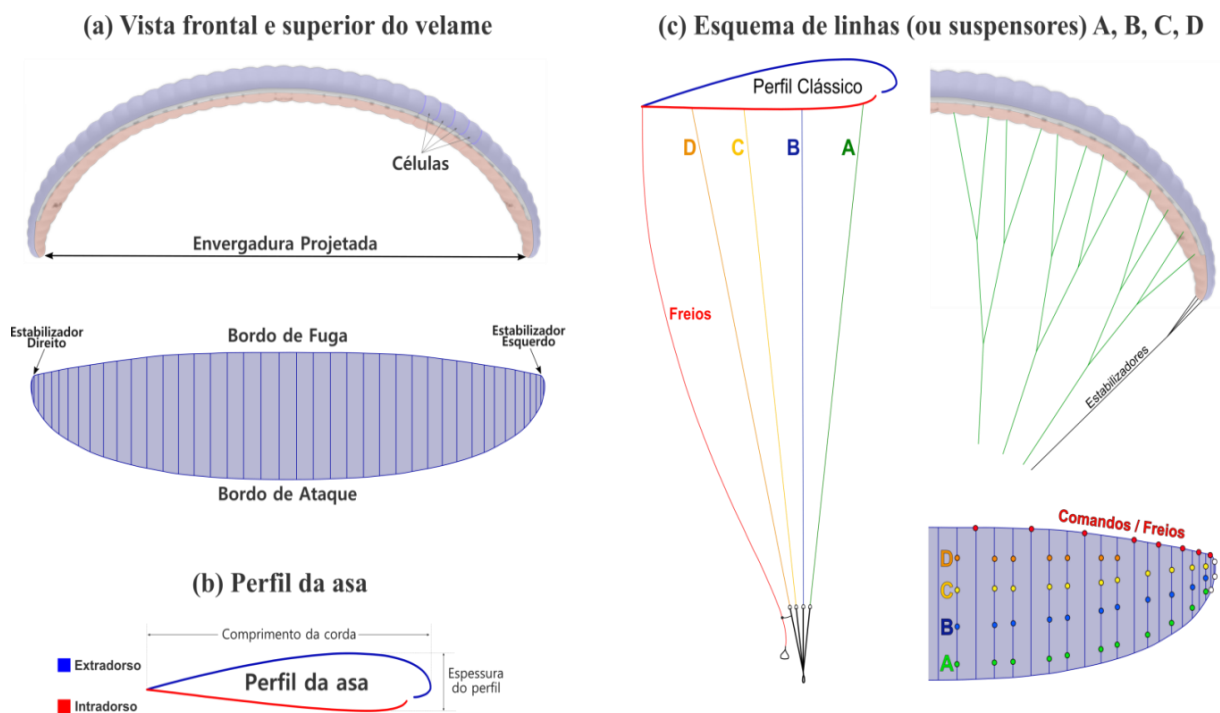
|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| 4.4.2.2      | <i>Goniometria - ângulo de contato</i> .....  | 38        |
| 4.5          | MUDANÇAS VISUAIS E MORFOLÓGICAS: MEV E COLORIMETRIA .....                             | 38        |
| 4.5.1        | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....  | 38        |
| 4.5.2        | Colorimetria (solidez da cor $\Delta E$ ) .....                                       | 39        |
| <b>5</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....  | <b>39</b> |
| 5.1          | CLIMATOLOGIA DO SÍTIO DE EXPOSIÇÃO .....  | 40        |
| 5.2          | ANÁLISES DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DO TECIDO ...                              | 42        |
| 5.2.1        | Permeabilidade ao ar .....  | 42        |
| 5.2.2        | Resistência ao rasgo .....  | 45        |
| 5.2.3        | Correlação entre irradiação acumulada e propriedades físicas e mecânicas.<br>.....    | 47        |
| 5.3          | ANÁLISES DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO TECIDO.....                              | 48        |
| <b>5.3.1</b> | <b>Espectroscopia: evidência molecular da degradação</b> .....                        | <b>48</b> |
| <b>5.3.2</b> | <b>Bandas de absorção: considerações espectrais</b> .....                             | <b>51</b> |
| <b>5.3.3</b> | <b>Alterações na região carbonílica (C=O)</b> .....                                   | <b>53</b> |
| <b>5.3.4</b> | <b>Alterações nas regiões alifáticas (N-H/O-H) e (C-H)</b> .....                      | <b>55</b> |
| <b>5.3.5</b> | <b>Degradação do náilon 6,6: evidências das bandas de amida</b> .....                 | <b>56</b> |
| <b>5.3.6</b> | <b>Revestimento de silicone: estabilidade e interações</b> .....                      | <b>57</b> |
| <b>5.3.7</b> | <b>Avaliação comparativa da estabilidade e degradação das colorações</b> ...<br>..... | <b>58</b> |
| 5.4          | GONIOMETRIA: AUMENTO DA POLARIDADE SUPERFICIAL.....                                   | 59        |
| 5.5          | EVIDÊNCIAS VISUAIS DA DEGRADAÇÃO: MEV E COLORIMETRIA .....                            | 61        |
| <b>6</b>     | <b>CONCLUSÃO</b> .....  | <b>66</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>68</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O PARAPENTE: CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS

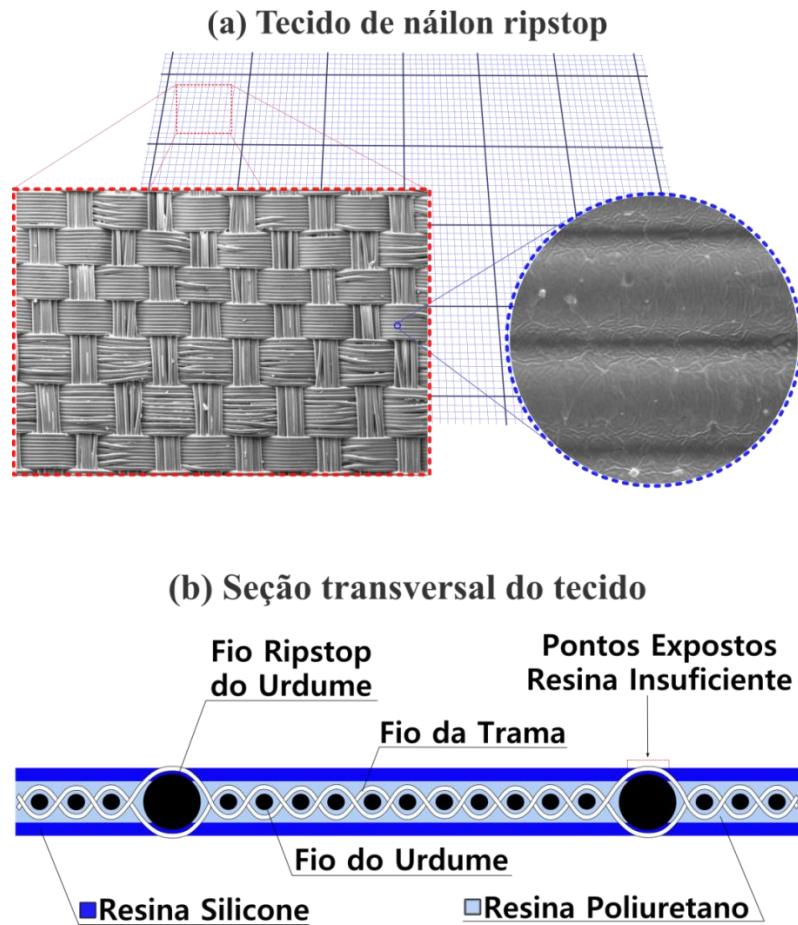
O parapente é uma aeronave de construção predominantemente têxtil e estruturalmente flexível, diferente de aeronaves com estruturas rígidas (Figura 1). Sua sustentação vem de um velame de tecido sintético que se infla e assume a forma de uma asa com o movimento relativo do ar. Controla-se a trajetória e a velocidade por meio de comandos que deformam seletivamente a geometria da asa, usando linhas que conectam o assento do piloto ao velame.

Figura 1 - Elementos de um paraplider: (a) vista frontal e superior, (b) perfil da asa e (c) esquema de linhas de suspensão.



Os velames de parapente são majoritariamente compostos por tecidos sintéticos de náilon ripstop resinados com poliuretano e silicone, cuja engenharia de materiais é detalhada na Figura 2. Esses tecidos são escolhidos por sua leveza, alta resistência mecânica e impermeabilidade ao ar.

Figura 2 - Esquema de engenharia do tecido técnico: (a) imagens da trama e impregnação de resina nos filamentos de náilon e (b) esquema da seção transversal do tecido.



Fonte: Adaptado de Tec-01 (2010).

## 1.2 VOO LIVRE DE PARAPENTE: PERCEPÇÃO DE RISCO E SEGURANÇA

O voo livre de parapente é uma modalidade de esporte de aventura que a Federação Aeronáutica Internacional (FAI) define como o voo não motorizado que emprega exclusivamente forças naturais, como o vento orográfico e as correntes térmicas. No entanto, essas atividades ocorrem em ambientes de risco e extrapolam frequentemente os limites da segurança convencional (Kunwar, 2021).

A motivação para essa atividade é multifatorial, apesar dos riscos e incertezas intrínsecos. Inclui aspectos psicológicos como desafio pessoal, senso de realização e bem-estar, potencializados pela imersão nas dinâmicas dos ambientes naturais e pelo vínculo com uma comunidade de praticantes. Dilmaç e Tezcan Kardaş (2024) destacaram que atividades recreativas assim podem induzir um "estado de fluxo", caracterizado por total envolvimento e concentração plena, no qual os praticantes



direção e intensidade, e a ausência de fenômenos que superem os limites de segurança.

Estudos climatológicos para a região indicaram que "as chuvas mais significativas iniciam-se em setembro e se estendem até o início de abril do ano seguinte" (Folhes; Fisch, 2006), com o verão apresentando "os maiores acumulados de precipitação" (Vieira *et al.*, 2023). Dessa forma, os períodos propícios para o voo seguro na região, de maior estabilidade atmosférica e menor precipitação, se dão no outono e inverno. Contudo, independentemente da sazonalidade, a exposição prolongada dos materiais sintéticos do parapente à irradiação solar, intensificada no verão, afeta diretamente a vida útil do equipamento.

A irradiação solar é composta por um espectro contínuo de ondas eletromagnéticas, classificadas conforme seus comprimentos de onda ( $\lambda$ ). Segundo Ferreira (2003), cada faixa do espectro possui características específicas e influências para os materiais, como mostrado na Tabela 1.

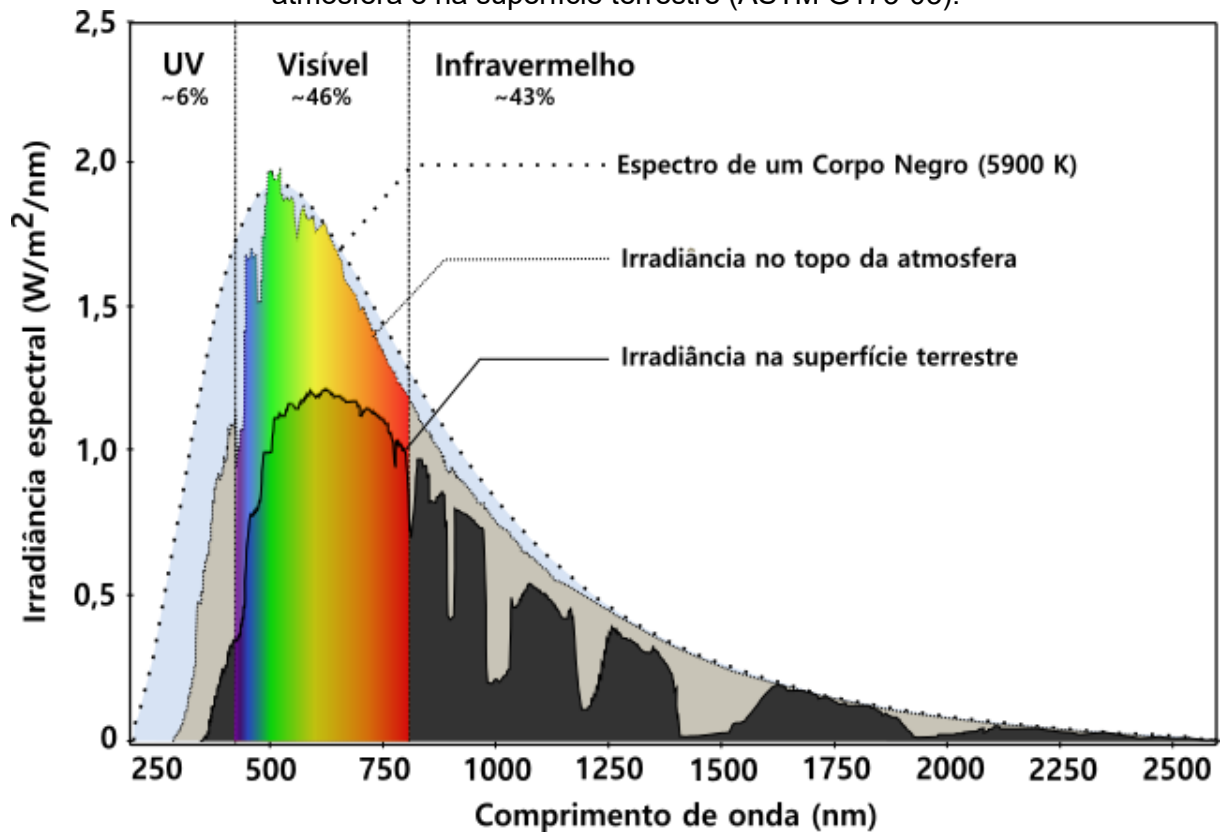
Tabela 1 - Regiões do espectro eletromagnético e seus efeitos nos materiais.

| Região do Espectro   | $\lambda$ (nm) | Efeitos/Influências relevantes                      |
|----------------------|----------------|---|
| <b>Ultravioleta</b>  | 290 e 380      | Provoca efeitos físico-químicos nos materiais.      |
| <b>Visível</b>       | 380 e 780      | Suas alterações de frequência compreendem as cores. |
| <b>Infravermelho</b> | 780 e 2500     | Radiação de natureza térmica.                       |

Fonte: Adaptado de Ferreira (2003).

A curva de Radiação Global, que representa o espectro solar padrão, está apresentada na Figura 4 e indica que a distribuição da radiação solar nas diferentes faixas do espectro ocorre nas seguintes proporções aproximadas: 6% no ultravioleta, 46% no visível e 43% no infravermelho (Ferreira, 2003).

Figura 4 - Distribuição espectral da energia solar ao nível do mar (radiação global), acima da atmosfera e na superfície terrestre (ASTM G173-03).



Fonte: Adaptado de Dornelles (2008).

Embora a radiação ultravioleta represente uma pequena parcela da irradiação solar total, seu elevado poder de degradação é notório, sendo capaz de quebrar ligações moleculares em materiais sintéticos. Mengüç; Temel e Bozdoğan (2018) ressaltaram que "os danos da radiação UV incluem perda de cor, fissuras e fragilidade e, por conseguinte a deterioração das propriedades mecânicas dos tecidos".

Apesar de suas qualidades intrínsecas, a exposição prolongada a ambientes externos submete esses materiais a um complexo processo de degradação, o que compromete sua integridade estrutural e funcional (Mengüç; Temel; Bozdoğan, 2018). Essa degradação se manifesta tanto em nível macroscópico, por meio da perda de resistência mecânica e alterações visuais, quanto em nível microscópico e molecular, onde a integridade das cadeias poliméricas é fundamentalmente comprometida (Andrady; Pandey; Heikkilä, 2019; Qin *et al.*, 2023).

A combinação dessas análises químicas com a avaliação de propriedades físico-mecânicas, como permeabilidade ao ar e resistência ao rasgo, e análises

morfológicas, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a colorimetria, é fundamental para uma compreensão abrangente da interação entre modificação química e comportamento mecânico, essencial para o desenvolvimento de materiais poliméricos mais duráveis.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo investigar a fotodegradação de tecidos de parapente do tipo ripstop de náilon 6,6 revestido com poliuretano e silicone, expostos à irradiação solar natural, com foco nas alterações físico-químicas e mecânicas do tecido. Essa análise busca compreender a deterioração das propriedades do tecido e correlacioná-la com a funcionalidade do material ao longo do tempo de uso, visando aprimorar os critérios de avaliação da condição desses equipamentos para a segurança operacional e o desempenho aerodinâmico.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo principal deste estudo tem como foco investigar a fotodegradação de tecidos ripstop de náilon 6,6 resinados com poliuretano e silicone sob exposição solar natural.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Quantificar a degradação das propriedades físico-mecânicas: Avaliar a perda de permeabilidade ao ar, resistência ao rasgo (Bettsometer) e força de rasgamento (urdume e trama) dos tecidos em função da exposição à irradiação solar.

Caracterizar as alterações físico-químicas e superficiais: Avaliar oxidação e degradação por Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) e variações na hidrofobicidade por goniometria em função da exposição à irradiação solar.

Investigar as mudanças visuais e morfológicas: analisar a solidez da cor ( $\Delta E$ ) por colorimetria e as alterações morfológicas superficiais via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Avaliar o potencial de restauração: Analisar a eficácia da reaplicação de resina de silicone na mitigação da degradação e na restauração de propriedades do tecido em condições limiares de aplicabilidade do tecido no parapente.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 FOTODEGRADAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

A interação da radiação solar com materiais poliméricos, especialmente tecidos ripstop de náilon 6,6 tratados com poliuretano e silicone, é fundamental para entender sua durabilidade em aplicações externas, como no parapente. A radiação UV é o principal fator no desgaste desses materiais, causando degradação irreversível (Chin, 2007). Stowe *et al.* (1973) demonstraram que o náilon 6,6 apresenta perdas na resistência à tração e sofre decomposição fotoquímica quando exposto à radiação UV, particularmente na faixa de  $350 \pm 50$  nm, predominante na luz solar.

A absorção de energia solar pelo náilon 6,6 resulta na sua transformação em energia térmica, o que pode intensificar os processos de fotodegradação e iniciar microdanos. Esse processo compromete ainda mais as propriedades mecânicas do material ao longo do tempo (Kayumov *et al.*, 2016). A compreensão desses mecanismos de degradação é crucial para desenvolver estratégias eficazes de mitigação da radiação UV e, assim, aumentar a longevidade de equipamentos para uso externo (Chin, 2007).

##### 3.1.1 Mecanismos de absorção de energia e efeitos da radiação ultravioleta

Os mecanismos de degradação incluem a cisão da cadeia e a reticulação, onde a radiação UV causa a quebra das cadeias poliméricas e a formação de novas ligações, alterando as propriedades mecânicas (Jellinek, 1967). Além disso, a luz visível desencadeia processos foto-oxidativos nos cromóforos dos corantes, que absorvem comprimentos de onda específicos e podem levar a mudanças estruturais (Kamweru *et al.*, 2014).

Embora o foco frequentemente recaia sobre os efeitos prejudiciais da radiação UV, algumas pesquisas sugerem que certas formulações poliméricas podem aumentar a resistência à degradação, indicando o potencial para o desenvolvimento de materiais mais duráveis no futuro (Gardette *et al.*, 2007).

### 3.1.2 Implicações para a durabilidade do tecido

A durabilidade de tecidos ripstop de náilon 6,6 é influenciada por sua capacidade de gerenciar a energia solar, especialmente por meio da absorção eficiente e da minimização da degradação. A otimização desses tecidos pode melhorar significativamente seu desempenho em diversas condições ambientais. Nesse contexto, inovações no design têxtil, como a incorporação de materiais que armazenam energia, podem aprimorar a resposta funcional desses tecidos à exposição solar (Bao *et al.*, 2024).

No campo do gerenciamento de energia solar, os Tecidos Térmicos Solares ou Tecidos Fototérmicos, compostos por nanofibras poliméricas e nanopartículas de negro de fumo, absorvem 94% do espectro solar (Jin *et al.*, 2018). Essas aplicações de captação de energia solar podem, inclusive, alimentar sistemas elétricos, evidenciando seu potencial prático (Abeywickrama *et al.*, 2023). Portanto, o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia baseados em têxteis é essencial para equilibrar o desempenho e a eficiência energética em têxteis inteligentes (Zhang *et al.*, 2023).

No entanto, existem fatores que comprovadamente aceleram a degradação, como níveis elevados de umidade (Horsfall, 1982; Lock; Frank, 1973). Além disso, a degradação térmica causada pela exposição ao calor e à luz pode levar a alterações irreversíveis na estrutura química do náilon (Schaffer *et al.*, 2000).

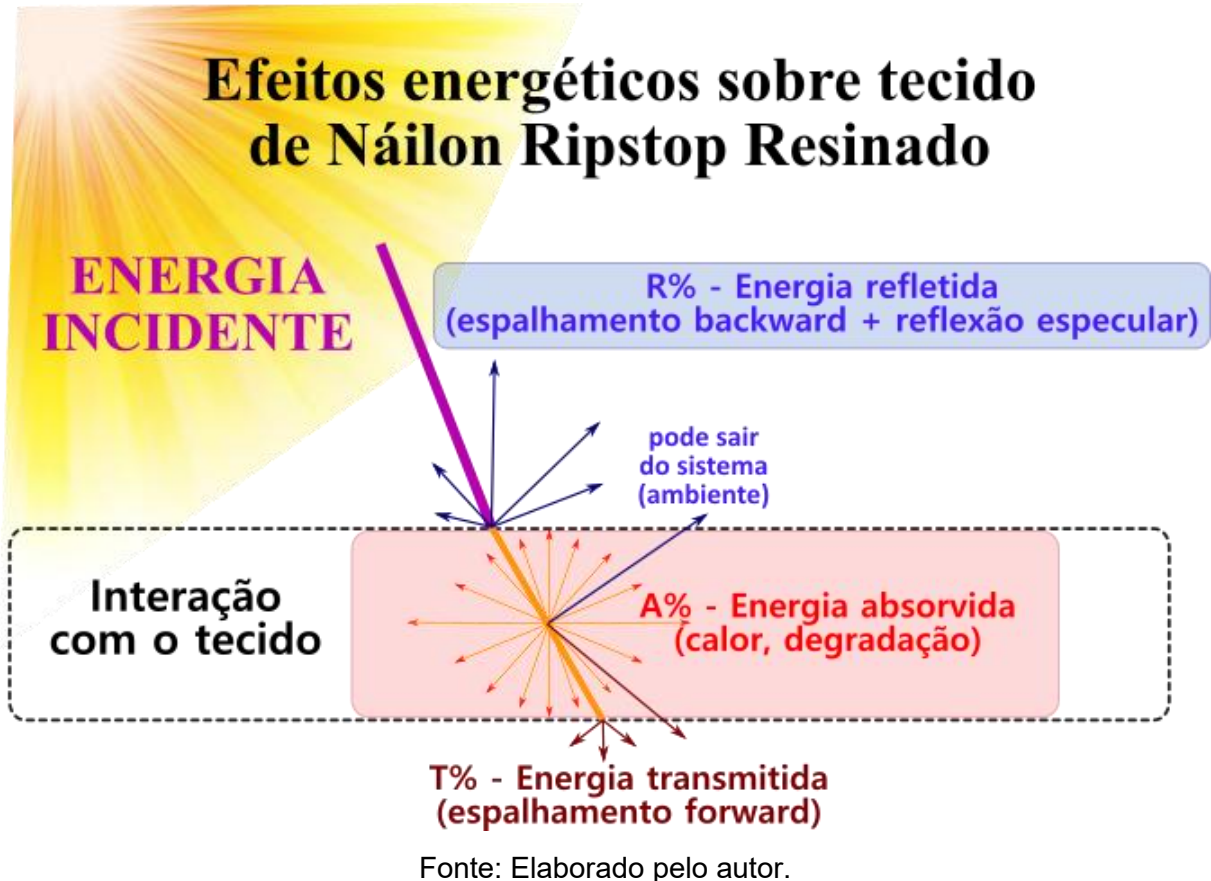
Embora a radiação solar seja frequentemente associada a efeitos prejudiciais, o potencial da energia solar para aprimorar a funcionalidade dos têxteis abre um caminho promissor para futuras pesquisas e aplicações. Essa dupla perspectiva ressalta a importância de uma abordagem equilibrada no design têxtil, englobando tanto os benefícios de proteção quanto os funcionais.

### 3.1.3 Distribuição da energia solar incidente

A distribuição da energia solar incidente em um substrato de nylon 6.6 com revestimento de poliuretano e silicone é crucial para entender os processos de fotodegradação. Em dias sem nuvens, a energia solar incidente média é de aproximadamente 25 a 28 MJ/m<sup>2</sup>/dia (Pereira *et al.*, 2017). A energia que atinge o

substrato pode ser dividida em energia refletida, transmitida e absorvida, cada uma delas influenciando a degradação de maneiras distintas (Figura 5).

Figura 5 - Esquema simplificado da interação da irradiação solar com o tecido.



A energia refletida (R%) varia entre 5% e 15%, sendo influenciada diretamente pela cor e pelo brilho da superfície do material. A energia transmissível (T%) é geralmente inferior a 5%, o que a torna insignificante para tecidos opacos ou resinados. A maior parcela, no entanto, é a energia absorvida (A%), que constitui entre 80% e 90% do total, sendo a principal força motriz da degradação (Sevillano-Bendezú *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2018).

Dentro da energia absorvida, a degradação ocorre por diferentes mecanismos: 40% a 60% são convertidos em calor armazenado, resultando em aumentos de temperatura. Uma porção de 5% a 20% da energia absorvida inicia a clivagem e oxidação do polímero, processos fotoquímicos que comprometem a integridade do material. Além disso, 10% a 30% da energia é dissipada como emissão térmica na

faixa do infravermelho (IV) (Sevillano-Bendezú *et al.*, 2022; Kliment, 2011; Dave; Halpern; Myers, 1975).

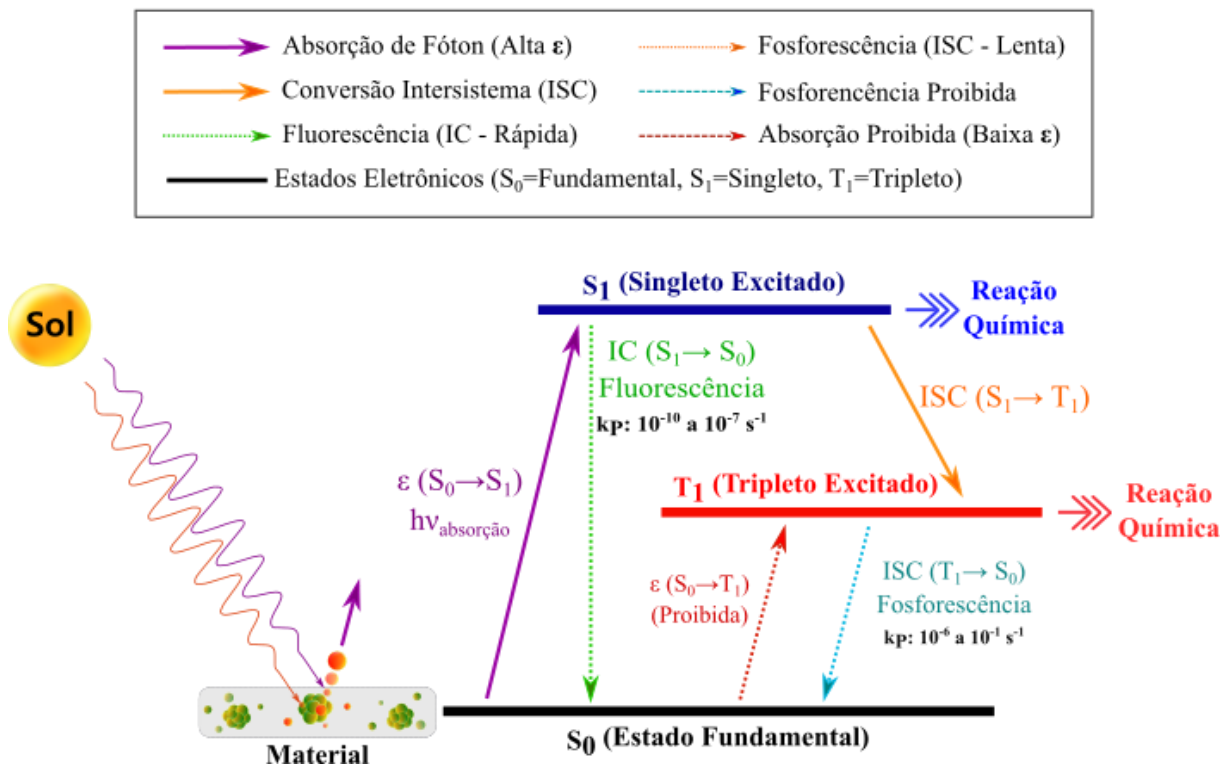
A cor do material exerce uma influência considerável na absorção de UV. Tecidos mais escuros absorvem uma quantidade maior de radiação UV do que cores mais claras, o que pode resultar em fotoquímicos acelerados (HAWKINS, 1984). Estudos apontam que mais de 65% da degradação em absorvedores de UV ocorre devido à luz com comprimentos de onda menores que 350 nm, ressaltando o papel da cor na absorção de energia (Pickett; Moore, 1995).

### 3.1.4 Diagrama de Jablonski: processos fotofísicos e fotoquímicos

O Diagrama de Jablonski simplificado, conforme Figura 6, ilustra os estados eletrônicos das moléculas, particularmente os estados singleto (S) e tripleto (T), que são diferenciados pelo spin do elétron.

Figura 6 - Diagrama de Jablonski simplificado com processos fotofísicos e fotoquímicos.

#### Diagrama de Jablonski simplificado - Processos fotofísicos e fotoquímicos.



### 3.1.4.1 Estados eletrônicos e absorção de fótons

O estado fundamental  $S_0$ , caracterizado por spins pareados, transita para estados excitados após a absorção de fótons. A transição primária,  $S_0 \rightarrow S_1$ , é a mais provável e eficiente, favorecida por seu alto coeficiente de extinção molar (Figura 6, seta roxa contínua). Essa transição é particularmente eficiente em aplicações práticas, como na energia fotovoltaica orgânica (Meyer *et al.*, 2017). Em contraste, a transição  $S_0 \rightarrow T_1$  é “proibida” devido à mudança de spin, resultando em um coeficiente de extinção significativamente menor e tornando-a menos provável em aplicações práticas (Figura 6, seta vermelha tracejada).

As implicações das transições “proibidas” são significativas, pois, mesmo com baixa probabilidade, elas podem impactar notavelmente o desempenho do material. A presença de impurezas pode alterar o comportamento esperado dos polímeros, limitando o seu uso em aplicações como a eletrônica orgânica (Meyer *et al.*, 2017; Rodriguez, 2005).

Embora o Diagrama de Jablonski enfatize a eficiência das transições singleto, o potencial de ocorrência de transições “proibidas”, sob certas condições, ilustra a dinâmica complexa das interações moleculares, que podem levar a resultados inesperados na estabilidade e no desempenho do material.

### 3.1.4.2 Processos de relaxamento e conversão

Os processos de relaxamento e conversão de moléculas excitadas envolvem diversas vias competitivas que determinam seu comportamento pós-excitação. Essas vias, que incluem relaxamento vibracional, como conversão interna (IC) e conversão intersistêmica (ISC), desempenham papéis cruciais na dissipação de energia e na dinâmica molecular.

O relaxamento vibracional ocorre rapidamente, dissipando energia como calor por meio de vibrações moleculares, tipicamente dentro do mesmo estado singleto ( $S_1$ ) ou através da conversão interna (IC) transitando para o estado fundamental ( $S_0$ ) de forma não radiativa (fosforescência). A conversão interna é caracterizada por uma constante de taxa rápida ( $k_{IC} \approx 10^{-10}$  a  $10^{-7}$  s<sup>-1</sup>), permitindo que as moléculas transitem entre níveis vibracionais de forma eficiente (Mukherjee; Varganov, 2021), (Figura 6, seta verde pontilhada).

A conversão intersistêmica (ISC) envolve uma mudança de spin do estado singleto ( $S_1$ ) para o estado tripleto ( $T_1$ ), sendo essencial para iniciar reações fotoquímicas devido às propriedades únicas do  $T_1$  (Figura 6, seta laranja sólida). Esse processo pode levar a dinâmicas complexas, especialmente quando as escalas de tempo de CI e ISC são comparáveis (Mukherjee; Varganov, 2021).

A fosforescência ocorre pela transição de  $T_1$  para  $S_0$ , que é "proibida" devido à conservação do spin, resultando em uma constante de taxa mais lenta ( $k_{ISC} \approx 10^{-6}$  a  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), permitindo potenciais interações com outras moléculas (Figura 6, seta azul-ciano pontilhada). A emissão de luz durante essa transição é significativa em diversas aplicações, incluindo fotoquímica em ciência dos materiais (Mukherjee; Varganov, 2021).

Embora esses processos de relaxamento sejam essenciais para a compreensão do comportamento molecular, é importante considerar que fatores externos podem influenciar essas dinâmicas, alterando potencialmente a eficiência da conversão de energia e das vias de relaxamento (El-Bayoumi, 1976; Eisinger, 1983).

### **3.1.4.3 Reações químicas: o caminho da degradação**

A fotodegradação de polímeros é impulsionada primariamente pelos estados excitados  $S_1$  e  $T_1$ , com o estado tripleto ( $T_1$ ) sendo o mais relevante devido à sua taxa mais lenta. Nesses estados há maior interação com o oxigênio e com o próprio meio do polímero, resultando na formação de espécies reativas de oxigênio e subsequentes modificações químicas (Figura 6, setas múltiplas azuis e vermelhas sólidas), como quebras de ligações e reticulação, as quais, em última análise, comprometem as propriedades do material (Rabek, 1995; Feil; Mcgreer; Cordo, 2022). Essas modificações químicas podem alterar drasticamente as propriedades mecânicas do polímero, tornando-o inadequado para o uso pretendido (Yousif; Haddad, 2013).

Para mitigar a fotodegradação, a incorporação de estabilizadores UV é uma estratégia eficaz, pois eles podem desativar os estados excitados antes que causem danos. Os tipos eficazes incluem supressores de estado excitado, como as benzofenonas e benzotriazóis, que impedem a formação de espécies reativas, e sequestradores de radicais livres, como as aminas impedidas (HALS – Hindered

Amine Light Stabilizers), que neutralizam os radicais livres, reduzindo a degradação (Yousif; Haddad, 2013).

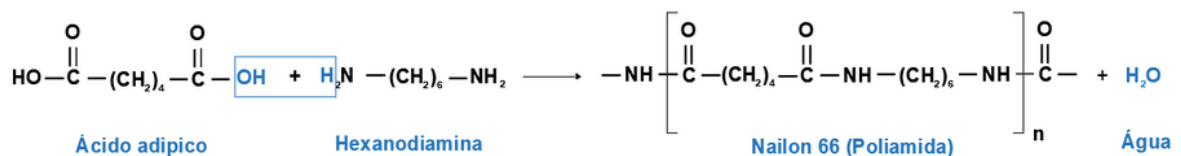
Alguns pesquisadores sugerem que a compreensão do processo de degradação pode, inclusive, levar ao desenvolvimento de materiais com vida útil projetada, potencialmente reduzindo o desperdício e aumentando a sustentabilidade no uso de polímeros (Geuskens, 1975).

## 3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES DO TECIDO

### 3.2.1 Náilon 6,6: síntese, propriedades e desafios ambientais

O náilon 6,6 é obtido por policondensação da hexametilenodiamina com o ácido adípico, formando cadeias poliméricas de alta cristalinidade e resistência (Viers, 2009; Mckeen, 2017), (Figura 7). Essa estrutura confere elevada tenacidade, resistência ao impacto e à abrasão, tornando-o adequado para aplicações industriais e têxteis de alto desempenho (Mckeen, 2017).

Figura 7 - Esquema da reação de formação do nylon 6.6 por policondensação.



Fonte: Adaptado de Araújo *et al.*, (2021).

A produção das poliamidas náilon 6 (PA6) e PA66 consolidou-se no período pós-Segunda Guerra Mundial, com rápida expansão entre as décadas de 1950 e 1970, impulsionada principalmente pelo crescimento das aplicações têxteis e industriais do náilon (Bethmann, 2021). Apesar de suas vantagens, sua produção depende de recursos petroquímicos e o material apresenta baixa biodegradabilidade, o que configura um desafio ambiental que demanda alternativas mais sustentáveis (Feng, 2013).

### 3.2.2 Compósitos têxteis de náilon 6,6 com revestimentos de PU e PDMS

A combinação de fibras de poliamida 6,6 (PA66) com revestimentos de poliuretano (PU) e polidimetilsiloxano (PDMS) resulta em tecidos técnicos de alta performance. O PA66 garante a integridade estrutural, enquanto o PU oferece propriedades de barreira, embora seja vulnerável à degradação por radiação UV (Chen *et al.*, 2009). Por sua vez, o PDMS proporciona excelente resistência à radiação e preserva a flexibilidade, contribuindo para maior durabilidade em condições adversas (Fung, 2004).

O desempenho final dos compósitos depende do método de aplicação utilizado, como laminação ou cura UV, e da compatibilidade entre as camadas. A adesão entre o PDMS e o substrato de PA66 é um fator crítico para a eficácia do material (Go *et al.*, 2016).

O poliuretano (PU) é amplamente utilizado em revestimentos têxteis devido à sua elasticidade, resistência mecânica e à sua capacidade de atuar como barreira contra água, ar e produtos químicos (Gillibrand, 1974; Erdodi; Krienen, 2021). A síntese do PU ocorre pela reação entre diisocianatos e polióis, sendo que a escolha desses monômeros define propriedades específicas como dureza e adesão (Häberle, 1995). No entanto, o PU é sensível à radiação ultravioleta, sofrendo fotodegradação que se manifesta como amarelamento e perda de desempenho físico-químico. Essas alterações podem ser monitoradas por espectroscopia no infravermelho (FTIR), por meio da identificação do aumento de grupos carbonila e hidroxila (Kerrigan; Lambert; Shearing, 1961).

O polidimetilsiloxano (PDMS), materiais que consistem de um esqueleto inorgânico silício-oxigênio (...-Si-O-Si-O-Si-O-...) com grupos laterais orgânicos ligados aos átomos de silício, destaca-se por suas propriedades termoestáveis, flexíveis e hidrofóbicas, atribuídas às suas ligações, que possuem alta energia de dissociação ( $\approx 450$  kJ/mol) (Deruelle; Yves, 2004). Essa estrutura química confere ao PDMS excelente resistência à radiação UV e a ambientes extremos, tornando-o ideal para aplicações em tecidos técnicos expostos ao ar livre ou a condições agressivas (Adams; Budden; Lawson, 1999; Chen *et al.*, 2024). Sua baixa energia superficial também contribui para o comportamento hidrofóbico dos compósitos, o que é desejável em aplicações que exigem repelência à água e autolimpeza.

Contudo, o uso do PDMS em substratos polares, como o PA66, enfrenta dificuldades relacionadas à baixa adesão. Para contornar esse obstáculo, são empregados tratamentos de superfície ou aplicação de primers que melhoram a

interação entre as fases (Chen *et al.*, 2024). Pesquisas recentes têm se concentrado em aprimorar essa adesão, permitindo a expansão do uso do PDMS em compósitos têxteis multifuncionais. Dessa forma, a engenharia de compósitos à base de PA66, PU e PDMS continua sendo um campo promissor para o desenvolvimento de materiais duráveis e tecnicamente avançados.

### **3.2.3 Mecanismos e efeitos da fotodegradação**

Os principais mecanismos de degradação por radiação UV em polímeros são a fotólise e a fotooxidação. Plásticos de engenharia, como a poliamida, estão sujeitos a ambos os processos devido à sua capacidade intrínseca de absorver radiação UV (Gijsman; Diepens, 2009). A luz UV desencadeia reações químicas complexas, frequentemente iniciadas por grupos carbonila e cetona introduzidos durante o processamento, o que leva à deterioração das propriedades físicas do material (Guillet, 1972).

#### **3.2.3.1 Início e propagação da fotodegradação**

A fotodegradação começa quando a radiação UV excita grupos cromóforos nos polímeros, levando à clivagem de ligações (por exemplo, C-N no náilon) e à formação de radicais livres. A energia dos fótons UV (300-600 kJ/mol) é suficiente para romper essas ligações, iniciando o processo degradativo (Gardette *et al.*, 2007; Rabek, 1995).

Na propagação oxidativa, os radicais livres reagem com o oxigênio atmosférico, formando radicais peroxila ( $\text{ROO}\cdot$ ), que perpetuam a degradação por meio de uma reação em cadeia autocatalítica. Esse processo pode prosseguir mesmo após o término da exposição à radiação UV, causando uma deterioração contínua do material (Rosu; Varganici; Rosu, 2016; Rabek, 1995). A degradação resulta na formação de subprodutos como álcoois, ácidos e compostos carbonílicos, que contribuem para a perda de propriedades mecânicas (Rabek, 2012; Zakaria; Rosnan, 2015).

Além disso, fatores ambientais como calor e umidade aceleram as reações de hidrólise, afetando particularmente os grupos amida e uretano em Nylon e Poliuretano, respectivamente (Gardette *et al.*, 2007; Zakaria; Rosnan, 2015).

### **3.2.3.2 Consequências da degradação e estratégias de mitigação**

A degradação de polímeros acarreta consequências significativas que afetam suas propriedades físicas e mecânicas, resultando da interação de fatores ambientais, incluindo influências térmicas, químicas e fotoquímicas. Uma das principais consequências é a redução da massa molar devido à cisão da cadeia, o que compromete permanentemente a integridade estrutural do polímero (Jansen, 2015; Venkatachalam *et al.*, 2012).

As propriedades mecânicas, como resistência à tração e alongamento, são significativamente afetadas, com estudos mostrando uma correlação direta entre exposição ambiental e perda de propriedades. O aumento da rugosidade da superfície devido à degradação pode, ainda, levar à falha prematura (Shimamura; Nakamura, 2011).

Em termos de alterações ópticas, a degradação pode causar amarelamento e descoloração, quantificados pelo aumento dos valores de solidez da cor ( $\Delta E$ ), o que indica uma perda na qualidade estética (Venkatachalam *et al.*, 2012). Adicionalmente, as alterações funcionais incluem a diminuição das propriedades de adesão dos revestimentos e a redução das capacidades de barreira, impactando a funcionalidade geral das aplicações poliméricas (Gijsman; Diepens, 2009).

Embora a fotodegradação e a degradação de polímeros representem desafios significativos para a longevidade dos materiais, avanços na química de polímeros, como a incorporação de estabilizadores de radiação UV e antioxidantes, podem mitigar esses efeitos. Os avanços em revestimentos protetores e aditivos também podem aumentar a longevidade e o desempenho dos materiais poliméricos em diversas aplicações. No entanto, a eficácia desses aditivos pode variar em condições reais diversas, o que dificulta o desenvolvimento de materiais duráveis.

### **3.2.4 Estudos anteriores sobre fotodegradação de tecidos técnicos**

A seguir, são apresentados os principais estudos e resultados encontrados na literatura relacionados à fotodegradação de tecidos técnicos, com ênfase nos mecanismos envolvidos, materiais avaliados e condições experimentais utilizadas.

### **3.2.4.1 Mecanismos e impactos da degradação**

Pesquisas detalham que a fotólise e a fotooxidação são os mecanismos químicos cruciais, nos quais radicais livres se formam, causando a quebra de ligações amida e uretano (Gijsman; Diepens, 2009; Zakaria; Rosnan, 2015). A umidade também exerce um papel exacerbador; estudos demonstram que altos níveis de umidade podem acelerar a perda das propriedades de tração em tecidos de náilon (Lock; Frank, 1973). Além disso, a estrutura química dos corantes influencia a degradação do tecido. Corantes com cromóforos específicos podem iniciar processos fotolíticos, resultando em desbotamento e danos oxidativos (Horsfall, 1982; Zakaria; Rosnan, 2015).

### **3.2.4.2 Revestimentos protetores e monitoramento**

A pesquisa sobre resinas de revestimento destaca a eficácia variável de diferentes materiais na proteção contra a degradação induzida por UV. Revestimentos de poliuretano (PU), embora funcionem como barreiras eficazes, são notavelmente suscetíveis a danos por UV, levando ao amarelamento e à perda de propriedades. Essa vulnerabilidade se manifesta em aumento da porosidade e formação de grupos hidrofílicos, que ampliam a absorção de água e a captação de SO<sub>2</sub> (Xu *et al.*, 2004). A exposição à radiação ultravioleta (UV), especialmente na faixa UVB, provoca alterações estruturais significativas, incluindo a ruptura de ligações químicas como C–H, Si–C e Si–O, resultando na degradação da rede polimérica e na diminuição das propriedades mecânicas, como brilho e resistência à tração (Wang *et al.*, 2021).

Em contraste, revestimentos de silicone (PDMS) apresentam estabilidade UV superior devido às robustas ligações Si–O–Si, tornando-os ideais para aplicações com alta exposição à radiação UV (Xu *et al.*, 2004).

Para o monitoramento da degradação, técnicas como FTIR/ATR são amplamente utilizadas para identificar alterações químicas em polímeros degradados, permitindo a quantificação da degradação e a avaliação de tratamentos protetores (Moghim, 2018). Adicionalmente, a microscopia eletrônica de varredura

(MEV) é empregada para analisar alterações morfológicas e a porosidade em revestimentos após exposição à radiação UV (Xu *et al.*, 2004).

### **3.2.4.3 Variáveis da durabilidade e estratégias de mitigação**

A durabilidade de materiais como tecidos PA66 em aplicações externas é significativamente influenciada por variáveis como fadiga mecânica, gramatura do tecido, tipo de corante e condições ambientais, incluindo a intensidade UV, temperatura e umidade (Smoleń *et al.*, 2024; Parejo; Zayat; Levy, 2006). Embora os revestimentos de PU sejam inerentemente vulneráveis à degradação por UV, a integração de estabilizantes UV, como derivados de benzofenona, pode aumentar sua resistência. Esses estabilizantes oferecem proteção UV abrangente e mantêm a integridade química dos revestimentos, apresentando uma abordagem promissora para melhorar a durabilidade dos revestimentos de PU em ambientes com alta radiação UV (Smoleń *et al.*, 2024; Parejo; Zayat; Levy, 2006). Essa pesquisa é essencial para o desenvolvimento de materiais mais duráveis e estratégias de proteção eficazes, oferecendo novos caminhos para aumentar a longevidade dos tecidos técnicos.

## **3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DA LITERATURA**

A revisão da literatura revela um panorama abrangente sobre a natureza, as vulnerabilidades e as estratégias de proteção do tecido de náilon frente às condições ambientais, com ênfase na degradação causada pela irradiação solar.

A estrutura semicristalina da PA66, embora responsável por suas excelentes propriedades mecânicas e térmicas, também apresenta fragilidades químicas associadas à presença dos grupos amida, que podem ser ativados fotoquimicamente.

A escolha de corantes e processos de tingimento é outro aspecto crítico, dado que certas estruturas cromofóricas, especialmente corantes azo, podem desencadear ou intensificar mecanismos de degradação, tanto do corante quanto da matriz de náilon. O tipo de interação (iônica, covalente, Van der Waals) afeta diretamente a estabilidade térmica e fotoquímica do sistema corante-substrato.

A aplicação de resinas como o poliuretano (PU) e o silicone (PDMS) surge como estratégia eficiente para mitigar a ação dos fatores ambientais. O PU apresenta boa adesão e flexibilidade, mas é vulnerável à radiação UV; o PDMS, por sua vez, oferece elevada resistência à degradação, sendo mais adequado a ambientes severos, ainda que requeira melhores práticas de ancoragem.

Por fim, destaca-se a importância da caracterização multidisciplinar para compreender e monitorar os mecanismos de degradação. O uso integrado de técnicas como FTIR/ATR, goniometria, MEV e ensaios mecânicos permite uma avaliação sistêmica e eficaz da perda de desempenho dos tecidos.

Essas técnicas, aplicadas de forma sinérgica, contribuem não apenas para a compreensão dos fenômenos envolventes, mas também para o desenvolvimento de estratégias de mitigação duradouras.

Em aplicações como os parapentes, onde a integridade do tecido é decisiva para a segurança, a compreensão profunda desses aspectos é essencial para o aprimoramento dos materiais e dos processos produtivos. Estudos futuros devem considerar o papel da reaplicação de resinas, da seleção de corantes mais estáveis e do balanceamento entre desempenho funcional e resistência à degradação para ampliar a vida útil dos tecidos técnicos empregados em condições ambientais reais.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 AMOSTRAS DE TECIDOS RIPSTOP DE NÁILON RESINADO

Os ensaios experimentais foram realizados com amostras de tecidos técnicos do tipo ripstop. Os tecidos, modelo WTX com gramatura de 29 g/m<sup>2</sup> e 40 g/m<sup>2</sup>, são confeccionados em náilon 6,6 e revestidos com poliuretano e silicone. As amostras foram obtidas em diferentes cores: amarelo, azul, branco, preto, verde e vermelho.

#### 4.1.1 Reaplicação de silicone em amostras de tecidos

Com o objetivo de avaliar o potencial da reaplicação de resina de silicone, esta foi reaplicada nas amostras de tecido após 300 horas de exposição. A partir desse ponto, foram realizadas coletas de dados em 400 e 500 horas de exposição para verificar o desempenho dos parâmetros de permeabilidade ao ar e resistência ao rasgo após a reaplicação.

##### 4.1.1.1 Produto Comercial Aplicado: *OUTDOOR Water Shield™ (Scotchgard™)*

Utilizou-se o repelente OUTDOOR Water Shield™ (Scotchgard™/3M), em aerossol pressurizado, desenvolvido para tecidos sintéticos expostos ao ambiente externo. Segundo o fabricante, sua composição inclui alcanos e cicloalcanos (C11–C15), gases de petróleo liquefeitos e purificados, e uma mistura de silicones.

##### 4.1.1.2 Reaplicação de silicone: *procedimento e condições ambientais*

A reaplicação da resina de silicone foi realizada após 300 horas de exposição contínua das amostras à radiação solar em ambiente natural, no município de São José dos Campos/SP, no mês de setembro de 2024, no intervalo das 11h às 12h. As condições meteorológicas médias no dia da reaplicação foram de 24°C±0,5°C de temperatura do ar e 50%±5% de umidade relativa do ar.

Antes da reaplicação, as amostras foram cuidadosamente limpas com um pincel de cerdas sintéticas (modelo: Pincel Trincha Pintura Artística Sintético 8044,

marca Keramik, 30 mm), para remover partículas sólidas acumuladas na superfície têxtil, evitando interferências na adesão da resina.

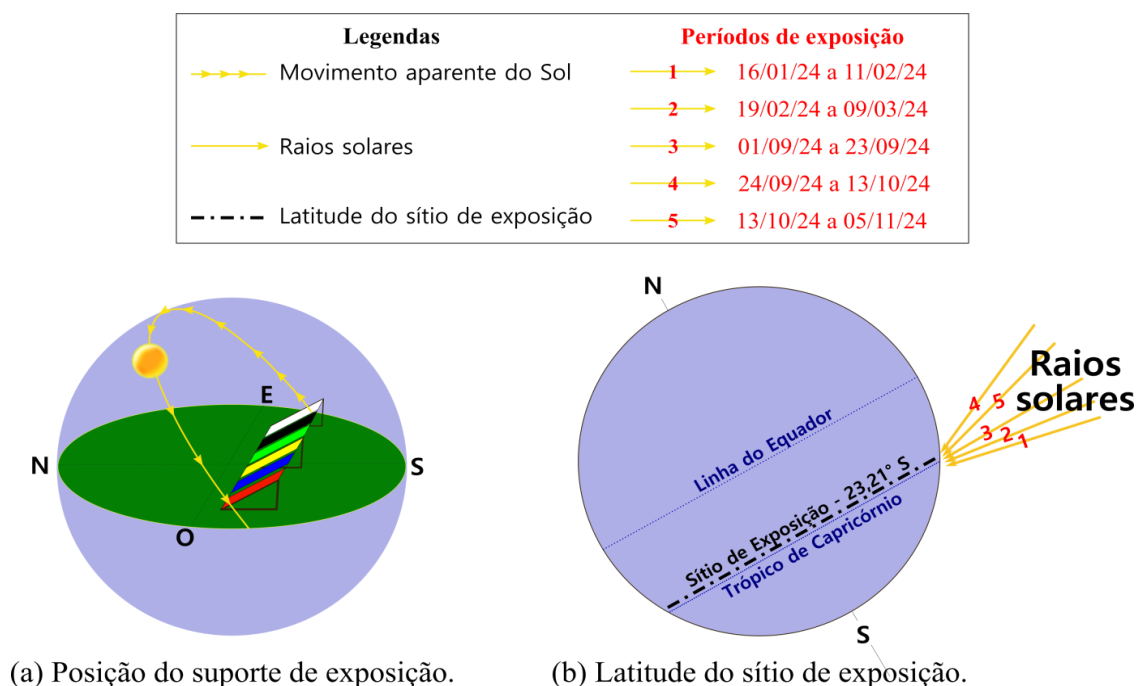
O produto foi pulverizado a uma distância de aproximadamente 20 cm da superfície do tecido, com movimentos constantes e paralelos, cobrindo uniformemente toda a área da amostra em uma única demão. Foram tomadas as massas das amostras antes e depois, por meio de uma Mini Balança Digital PRO-50, marca Fuzion, para calcular a média de resina por metro quadrado aplicada.

Após a reaplicação, as amostras permaneceram por 24 h em ambiente coberto e ventilado para secagem e fixação do revestimento, sendo então retomadas para continuidade da exposição solar.

## 4.2 LOCAL E PERÍODOS DE EXPOSIÇÃO

A exposição solar das amostras ocorreu no município de São José dos Campos, estado de São Paulo, em dias ensolarados ou com baixa nebulosidade, nos períodos ilustrados na Figura 8. As coordenadas do sítio de exposição são: altitude de 646 m, latitude de  $23,21^\circ$  S e longitude de  $45,87^\circ$  W.

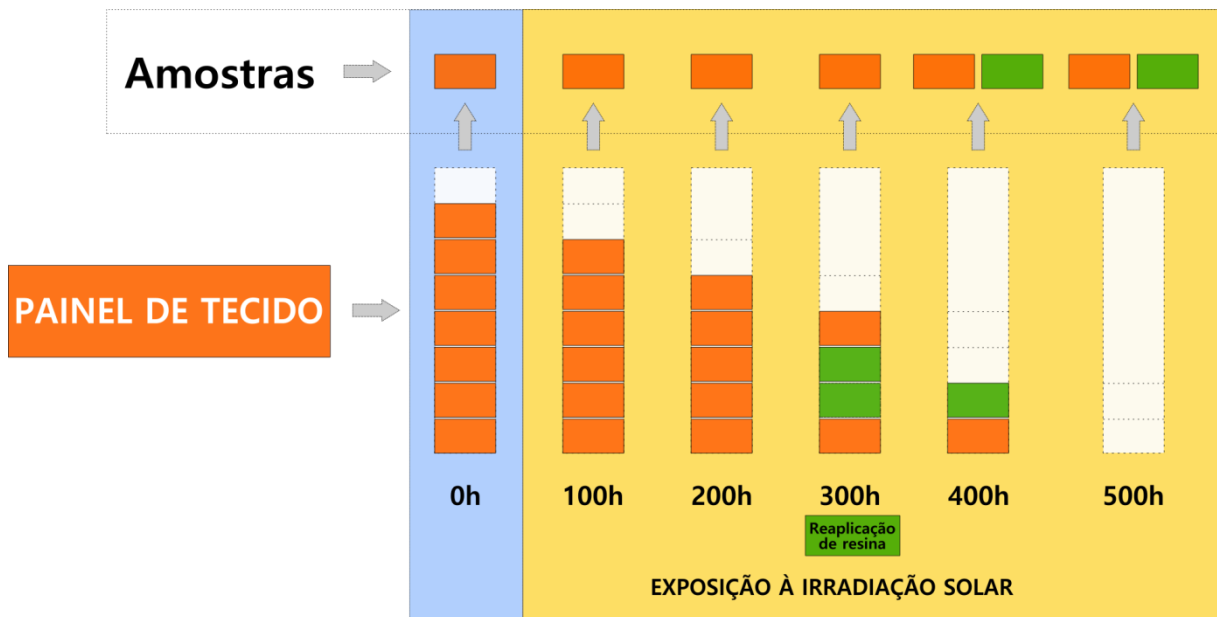
Figura 8 - Detalhes do sítio de exposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O expositor foi orientado para o norte e inclinado a 23,21°, de acordo com a latitude local, visando otimizar a captação da irradiação solar. As amostras foram coletadas aleatoriamente ao longo do tempo, em quantidade adequada para atender às normas de aquisição de dados, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema de coleta de amostras durante exposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO SÍTIO DE EXPOSIÇÃO

Para caracterizar a climatologia do ambiente de exposição, foram utilizados dados de irradiância solar global, com resolução temporal de um minuto, por meio de um piranômetro modelo CMP6, da fabricante Vaisala. O sensor opera na faixa espectral de 285 a 2800 nm.

As amostras foram expostas diariamente em condições de céu claro (cobertura de nuvens inferior a 5/8), sendo posicionadas no expositor preferencialmente às 9h e removidas às 17h.

Os ciclos de exposição foram definidos em blocos aproximados de 100 horas, e buscou-se manter um valor médio de irradiação solar incidente semelhante ao da primeira exposição a partir da segunda exposição.

A partir dos dados de irradiância global ( $W/m^2$ ), foram calculadas as seguintes métricas:

- Média das irradiâncias diárias ( $W/m^2$ ): média aritmética das irradiâncias médias diárias.
- Total de irradiação incidente ( $MJ/m^2$ ) por período de cada lote de 100h: soma das irradiâncias minuto a minuto durante cada período de 100h, com conversão dos valores de  $W/m^2$  para  $MJ/m^2$  (1 W em 1 hora = 0,0036 MJ).
- Total acumulado de irradiação ao longo dos períodos ( $MJ/m^2$ ): soma total da energia incidente (em  $MJ/m^2$ ) considerando todos os dias válidos de exposição.

As variáveis meteorológicas analisadas, temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ) e umidade relativa do ar (%), foram obtidas por meio de um sensor Vaisala HMP-45C (Humidity and Temperature Probe), com registros automáticos e contínuos a cada minuto.

Os dados meteorológicos foram processados da seguinte forma:

- Média das temperaturas médias diárias ( $^{\circ}C$ ): média da temperatura minuto a minuto ao longo de cada dia.
- Média das umidades relativas médias diárias (%): média diária dos valores de umidade relativa.
- A cobertura do céu foi estimada visualmente em oitavos, de hora em hora, por observadores meteorológicos. Esses dados foram obtidos a partir de registros de METAR (Meteorological Aerodrome Report) do Aeroporto Internacional de São José dos Campos – Professor Urbano Ernesto Stumpf, localizado a cerca de 600 metros do local de exposição, e disponibilizados pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET).

A climatologia das variáveis meteorológicas foi realizada utilizando apenas os registros horários que coincidiam com o período de exposição das amostras.

#### **4.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO**

Esta seção detalha os procedimentos experimentais e as técnicas de caracterização empregadas para avaliar a degradação de tecidos de náilon 6,6 ripstop, submetidos à exposição solar.

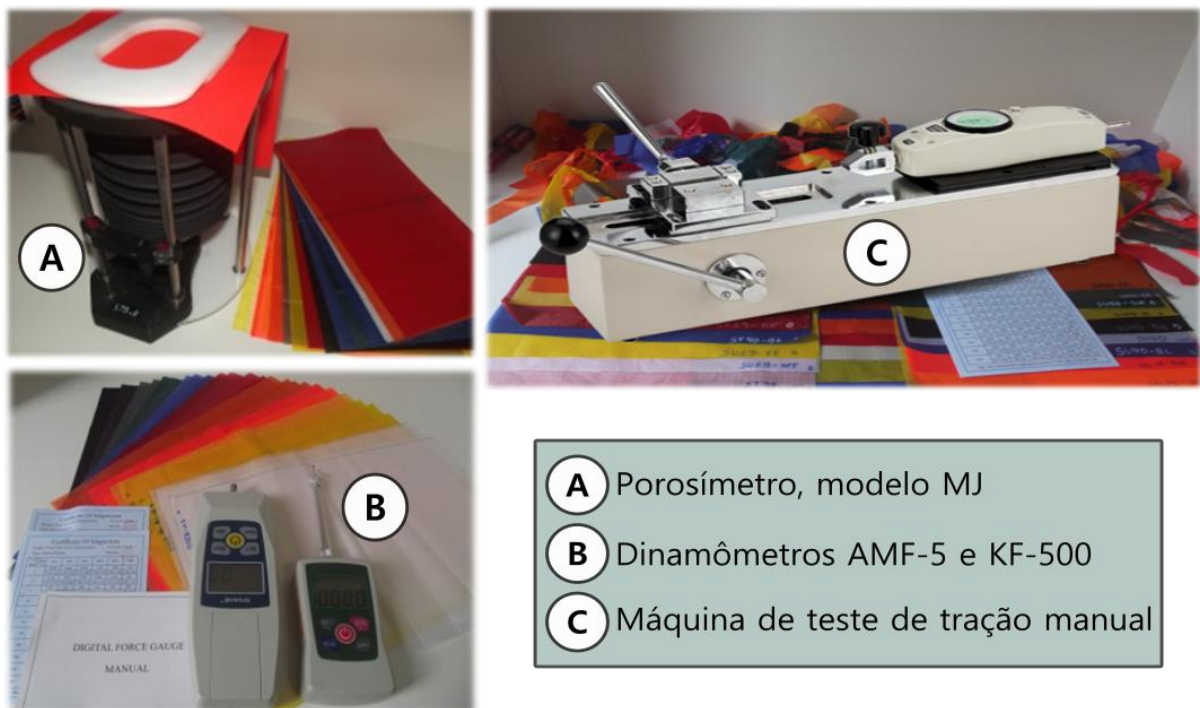
#### 4.4.1 Caracterização físico-mecânica do tecido

As propriedades físico-mecânicas das amostras foram avaliadas por meio dos seguintes ensaios:

- Permeabilidade ao ar: medida em  $L_{ar}/m^2/min$ , utilizando um Porosímetro, modelo MJ (Jantas, [2025]), conforme as diretrizes da norma DRAFT PMA (PMA Research Paper, 2024).
- Resistência ao rasgo (Bettsometer): determinada em daN, empregando um dinamômetro digital modelo AMF-5 (SHAHE®, 2024), seguindo a DRAFT PMA.
- Força de rasgamento no urdume e na trama: medida em daN, utilizando um dinamômetro digital modelo KF-500 (SHAHE®, 2024), em conformidade com a NBR ISO 13937-2 (Têxteis — Propriedades de rasgamento de tecidos — Parte 2: Determinação da força de rasgamento de amostras em forma de calça de ensaio simples).

Na Figura 10 são apresentadas imagens dos equipamentos empregados na avaliação das propriedades físico-mecânicas dos tecidos.

Figura 10 - Equipamentos utilizados para caracterização físico-mecânica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Parâmetros medidos:

- Permeabilidade ao ar, em  $L_{ar}/m^2/min$ : variável inversamente proporcional ao desempenho aerodinâmico (menores valores indicam melhor desempenho).
- Resistência ao rasgo (Bettsometer), em daN: variável diretamente proporcional ao desempenho estrutural (maiores valores indicam melhor desempenho).
- Força de rasgamento na trama, em daN: variável diretamente proporcional ao desempenho (maiores valores indicam melhor desempenho).
- Força de rasgamento no urdume, em daN: variável diretamente proporcional ao desempenho (maiores valores indicam melhor desempenho).

#### **4.4.2 Caracterização físico-química e morfológica do tecido**

As amostras foram submetidas a análises complementares para investigar os mecanismos de degradação em nível molecular, superficial e morfológico por meio de testes de espectroscopia no infravermelho (FTIR) e Goniometria. O objetivo era investigar os mecanismos de degradação superficial e estrutural induzidos pela exposição à irradiação solar, com evidências visuais por meio de MEV e colorimetria.

##### **4.4.2.1 Espectroscopia no infravermelho (FTIR)**

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier com acessório de refletância total atenuada (FTIR-ATR) foi utilizada para analisar as alterações moleculares nas amostras. As aquisições espectrais foram realizadas usando o Espectrômetro da Perkin Elmer Spectrum, operando com resolução espectral de  $4\text{ cm}^{-1}$ . Os espectros foram obtidos com detector TGS (tellurium-gallium-sulfide), em modo de absorbância, cobrindo a faixa espectral de 4000 a  $550\text{ cm}^{-1}$ , que é relevante para a identificação de grupos funcionais orgânicos e poliméricos.

A amostragem foi realizada diretamente na face externa resinada do tecido, sem preparo químico prévio, utilizando um acessório de refletância total atenuada (ATR).

O objetivo principal foi detectar e monitorar a presença, surgimento ou desaparecimento de bandas características relacionadas à degradação química do sistema polimérico.

#### **4.4.2.2 Goniometria - ângulo de contato**

A goniometria é empregada para avaliar a molhabilidade da superfície, a partir da medição do ângulo de contato ( $\theta$ ) formado entre uma gota de líquido e a superfície do tecido. Tecidos hidrofóbicos apresentam ângulos maiores ( $>90^\circ$ ), enquanto substratos mais polares e degradados têm ângulos menores ( $<90^\circ$ ).

Para a avaliação da hidrofobicidade superficial das amostras, foi utilizado um goniômetro óptico de precisão com câmera digital integrada (modelo: KRÜSS DSA100), capaz de mensurar o ângulo de contato ( $^\circ$ ) por meio do método da gota sésil.

A goniometria, nesse contexto, foi empregada de forma complementar à espectroscopia no infravermelho de modo a correlacionar as alterações químicas detectadas com os efeitos funcionais observáveis, como a perda de hidrorrepelência e das propriedades de barreira conferidas por tratamentos superficiais hidrofóbicos.

### **4.5 MUDANÇAS VISUAIS E MORFOLÓGICAS: MEV E COLORIMETRIA**

#### **4.5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A análise morfológica da superfície dos tecidos foi conduzida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando um equipamento ZEISS EVO® MA 10. O principal objetivo dessa técnica era identificar alterações na topografia superficial, como fissuras e outros sinais de degradação estrutural causados pela exposição ambiental. A MEV permitiu uma avaliação qualitativa e comparativa das mudanças morfológicas, sendo fundamental para correlacionar essas alterações com os dados físico-mecânicos dos tecidos.

#### **4.5.2 Colorimetria (solidez da cor $\Delta E$ )**

A variação de cor ( $\Delta E$ ) das amostras, um indicador do nível de desbotamento, foi medida em conformidade com a ABNT NBR ISO 105-J01:2008. Para isso, utilizou-se um colorímetro modelo WR-10 (FRU®, 2024), devidamente calibrado conforme as instruções do fabricante.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e interpreta os resultados obtidos a partir da exposição ambiental controlada de tecidos ripstop de náilon 6,6, resinados com poliuretano e silicone, em diferentes colorações. As análises mecânicas, químicas e morfológicas permitiram construir um quadro integrado sobre os efeitos da radiação solar na integridade do material, com foco na degradação funcional e estrutural.

### 5.1 CLIMATOLOGIA DO SÍTIO DE EXPOSIÇÃO

A caracterização climatológica do sítio de exposição, obtida por meio de um piranômetro, está apresentada na Tabela 2. Os dados mostram as condições de irradiação solar a que as amostras foram submetidas.

Tabela 2 – Climatologia da irradiação solar no local de exposição

| <b>Períodos de exposição</b>                  | <b>Média das irradiações diárias (W/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Total de irradiação no período (MJ/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Total acumulado de irradiação ao longo dos períodos (MJ/m<sup>2</sup>)</b> |
|---|--|--|---|
| <b>16/01/24 a 11/02/24</b><br>- 96 h e 30 min | 795  | 275,5  | 275,5   |
| <b>19/02/24 a 09/03/24</b><br>- 96 h e 17 min | 740  | 255,7  | 531,2   |
| <b>01/09/24 a 23/09/24</b><br>- 97 h e 05 min | 702  | 245,8  | 777,0   |
| <b>24/09/24 a 13/10/24</b><br>- 97 h e 03 min | 719  | 251,6  | 1028,6  |
| <b>13/10/24 a 05/11/24</b><br>- 93 h e 31 min | 706  | 237,9  | 1266,5  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que as médias diárias de irradiação solar, bem como os totais acumulados por período, apresentaram valores consistentes e próximos entre si, o que demonstra a efetividade do monitoramento e controle das condições de

exposição. Esses resultados corroboram o sucesso na condução dos ensaios sob irradiação solar representativa e dentro dos parâmetros estabelecidos.

Os dados meteorológicos apresentados na Tabela 3 foram processados considerando apenas os registros coincidentes com o intervalo de exposição das amostras, o que reflete com exatidão as condições climáticas atuantes durante os ensaios.

Tabela 3 – Estatísticas dos dados meteorológicos nos períodos das exposições.

| <b>Períodos de exposição</b>                  | <b>Média das temperaturas médias diárias (°C)</b> | <b>Média das umidades relativas médias diárias (%)</b> | <b>Porcentual de céu nublado durante exposição parcial (%)</b> |
|---|---|--|--|
| <b>16/01/24 a 11/02/24</b><br>- 96 h e 30 min | 29,5  | 55   | 13   |
| <b>19/02/24 a 09/03/24</b><br>- 96 h e 17 min | 29,5  | 60   | 43   |
| <b>01/09/24 a 23/09/24</b><br>- 97 h e 05 min | 27,6  | 45   | 6  |
| <b>24/09/24 a 13/10/24</b><br>- 97 h e 03 min | 27,7  | 47   | 16   |
| <b>13/10/24 a 05/11/24</b><br>- 93 h e 31 min | 27,2  | 56   | 29   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

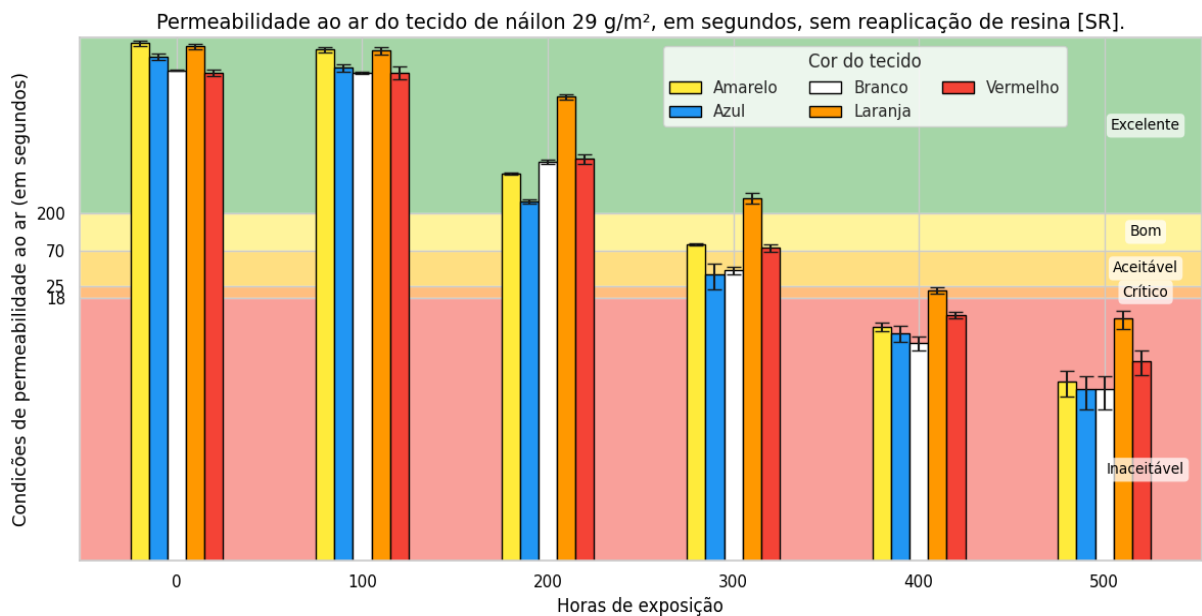
Os dados meteorológicos registrados durante os períodos de exposição indicam temperaturas médias diárias relativamente estáveis, variando entre 27,2 °C e 29,5 °C. A umidade relativa do ar oscilou moderadamente entre 45% e 60%. A cobertura do céu por nuvens, por outro lado, apresentou variação mais expressiva, com destaque para o intervalo de 19/02 a 09/03, que registrou o maior percentual de nebulosidade (43%). Essa condição atmosférica menos favorável representou um desafio adicional, exigindo maior controle e acompanhamento. Nos demais períodos, a predominância de céu claro favoreceu a uniformidade das condições de irradiação, contribuindo para a robustez dos resultados.

## 5.2 ANÁLISES DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DO TECIDO

### 5.2.1 Permeabilidade ao ar

A análise da permeabilidade ao ar (Figura 11) para as amostras de 29 g/m<sup>2</sup> revela uma redução gradual até 300 horas de exposição, período em que os valores se mantêm em níveis aceitáveis. No entanto, entre 300 e 400 horas, a permeabilidade atinge condições críticas e inaceitáveis para aplicações em parapente. Essa mudança sugere uma alteração significativa no comportamento do material, possivelmente devido à intensificação dos mecanismos de deterioração da matriz polimérica da camada de resina superficial.

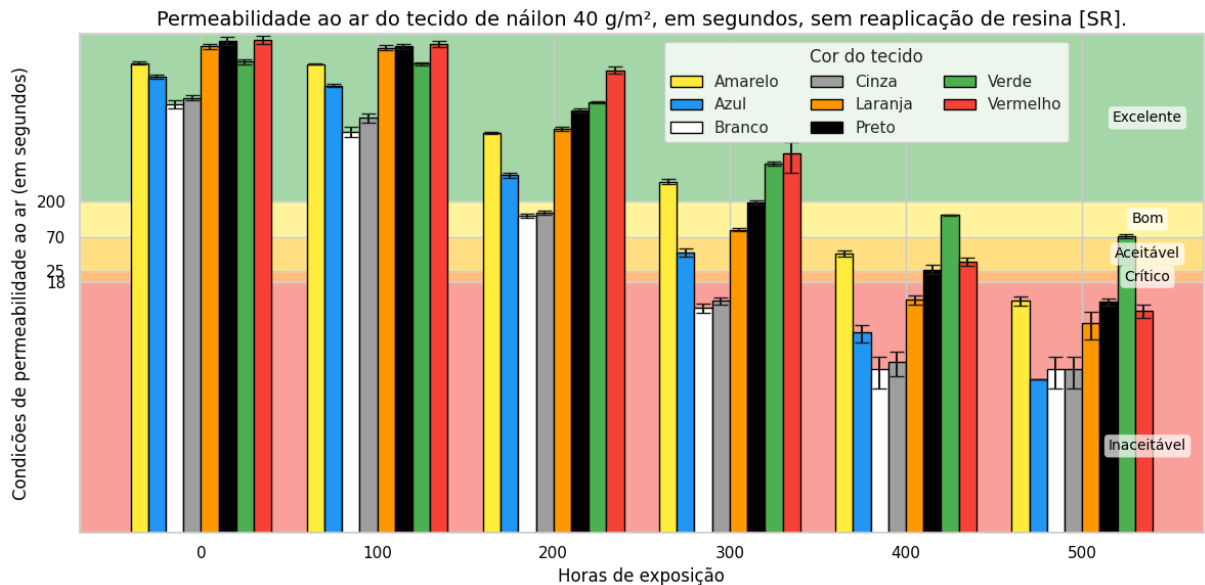
Figura 11 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 29 g/m<sup>2</sup>, sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na gramatura de 40 g/m<sup>2</sup>, a degradação da permeabilidade atinge valores críticos entre 400 e 500 horas de exposição, com a maioria das cores seguindo esse padrão (Figura 12). No entanto, os tecidos branco e cinza apresentaram uma degradação mais acelerada, alcançando condições críticas já às 300 horas. O tecido verde se destacou por sua maior resistência, permanecendo nas faixas "Boa" e "Aceitável" mesmo após 500 horas de exposição.

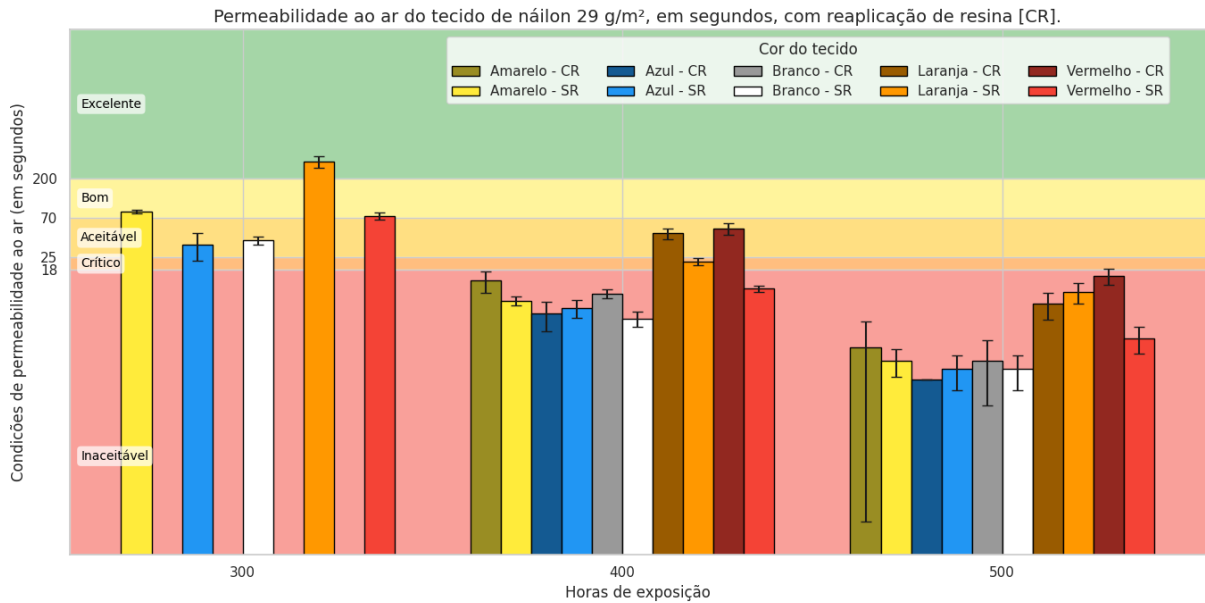
Figura 12 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 40 g/m<sup>2</sup>, sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.



A degradação acelerada da permeabilidade do ar, observada em geral a partir das 300 horas de exposição solar, está em consonância com a compreensão de que a exposição prolongada à radiação UV promove a quebra das cadeias poliméricas, levando à perda da integridade estrutural. Esse efeito é amplamente reconhecido, uma vez que, "durante a interação com a radiação UV, átomos são removidos das cadeias poliméricas, rompendo as macromoléculas e causando a despolimerização, degradação química ou fotodegradação, e levando à perda da estabilidade estrutural dos materiais" (Amza *et al.*, 2021; Kalwik; Postawa, 2023).

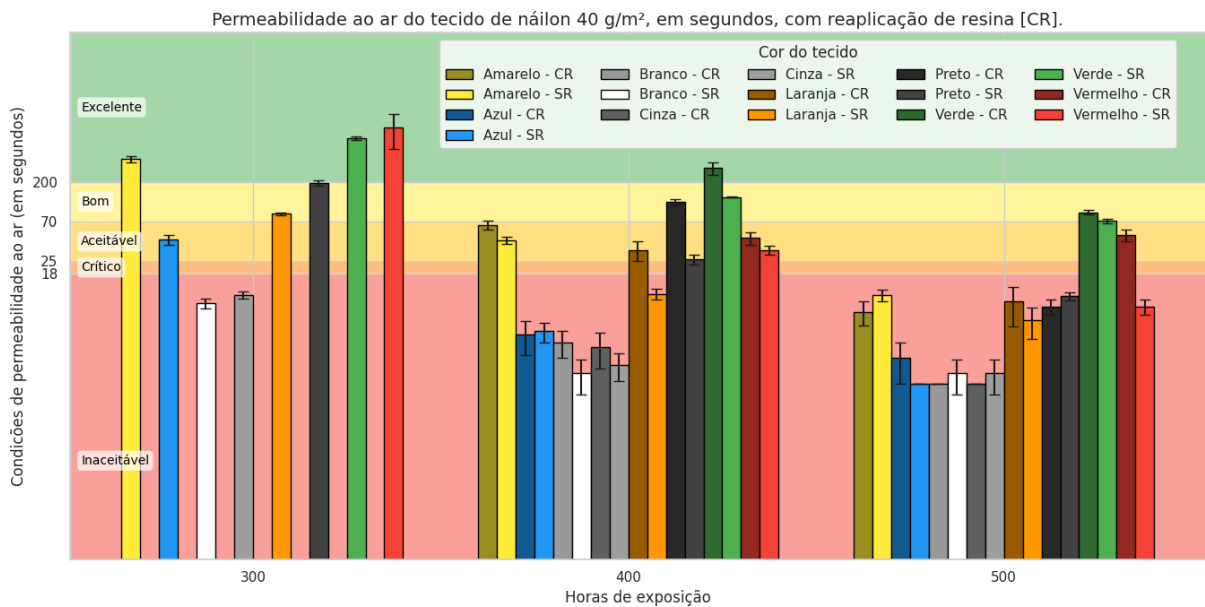
A reaplicação de resina de silicone adicionou uma massa média de 3,00 g/m<sup>2</sup> ( $\pm 1,25$  g/m<sup>2</sup>) ao tecido. O desempenho da permeabilidade ao ar para os tecidos de 29 g/m<sup>2</sup> e 40 g/m<sup>2</sup> após essa reaplicação é apresentado nas Figuras 13 e 14, respectivamente, com foco nos períodos de exposição de 400 e 500 horas.

Figura 13 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 29 g/m<sup>2</sup>, com (CR) e sem (SR) reaplicação de resina, em função do tempo de exposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Permeabilidade ao ar das amostras de tecidos de náilon ripstop de 40 g/m<sup>2</sup>, com (CR) e sem (SR) reaplicação de resina, em função do tempo de exposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

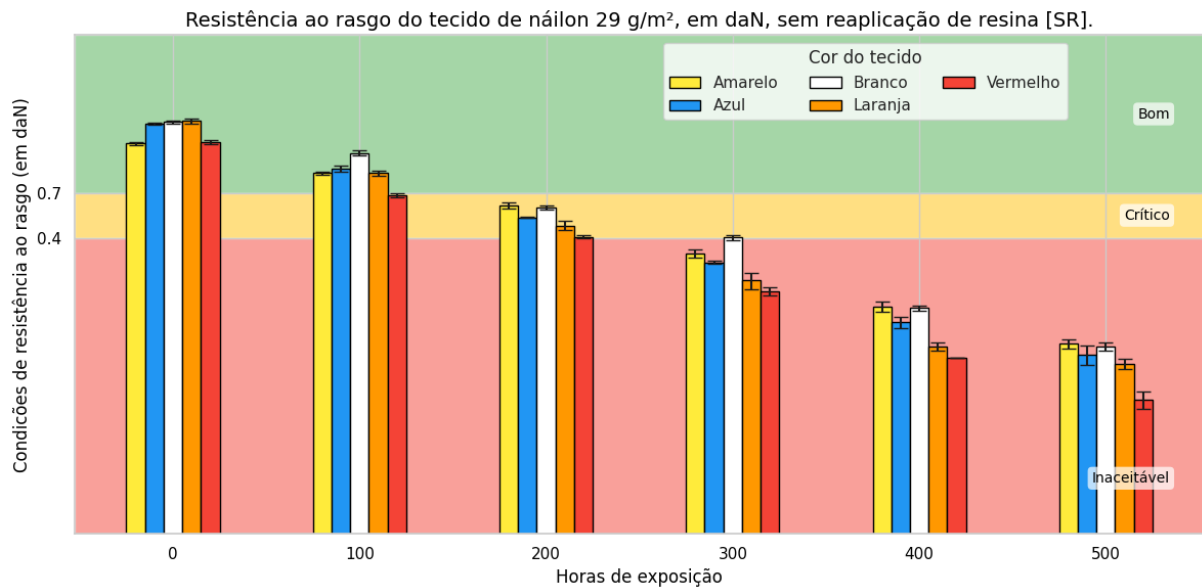
A reaplicação de silicone resultou em uma melhoria aparente na permeabilidade ao ar. No entanto, essa intervenção não foi suficiente para elevar as propriedades do material de patamares críticos para a faixa de aceitabilidade. Isso

sugere que a eficácia da reaplicação é limitada quando o substrato polimérico já está significativamente comprometido.

## 5.2.2 Resistência ao rasgo

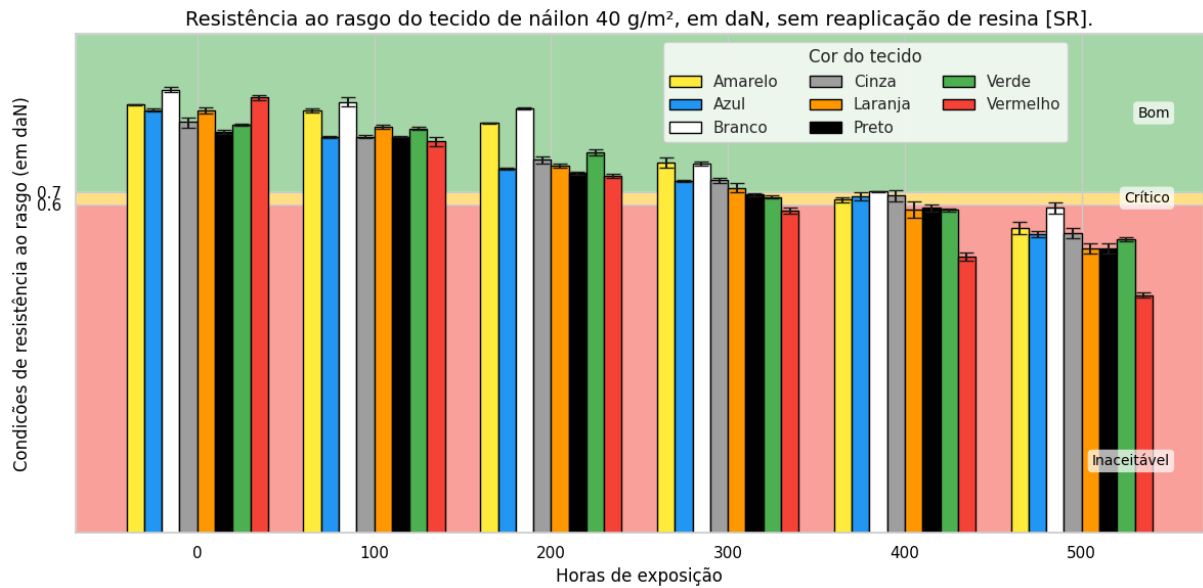
A análise da resistência ao rasgo (Figura 15) para as amostras de 29 g/m<sup>2</sup> demonstra que, embora a degradação seja gradual, os valores atingem condições críticas e inaceitáveis para aplicações em parapente já no intervalo entre 200 e 300 horas de exposição.

Figura 15 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 29 g/m<sup>2</sup>, sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.



A análise da resistência ao rasgo (Figura 16) para as amostras de 40 g/m<sup>2</sup> revela que a degradação da propriedade resulta em valores críticos em torno de 400 horas para a maioria das cores. Contudo, foram notadas discrepâncias no desempenho: o tecido de cor vermelha apresentou uma deterioração mais acelerada, alcançando a faixa crítica já às 300 horas, ao passo que o tecido branco demonstrou maior durabilidade, mantendo o desempenho aceitável até 500 horas de exposição.

Figura 16 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 40 g/m<sup>2</sup>, sem reaplicação de resina (SR), em função do tempo de exposição.



A falha generalizada dos tecidos após 500 horas de exposição reforça o limite de vida útil desses materiais sob irradiação solar.

O desempenho da resistência ao rasgo para os tecidos de 29 g/m<sup>2</sup> e 40 g/m<sup>2</sup> após a reaplicação de resina de silicone é apresentado nas Figuras 17 e 18, respectivamente, com foco nos períodos de exposição de 400 e 500 horas.

Figura 17 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 29 g/m<sup>2</sup>, com (CR) e sem (SR) reaplicação de resina, em função do tempo de exposição.

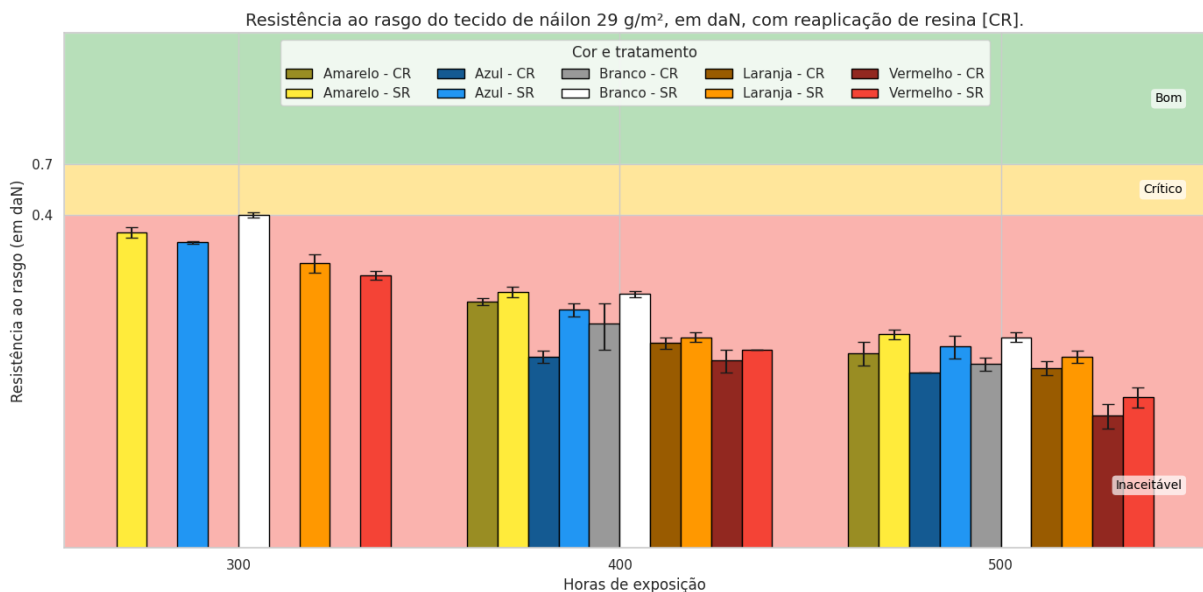
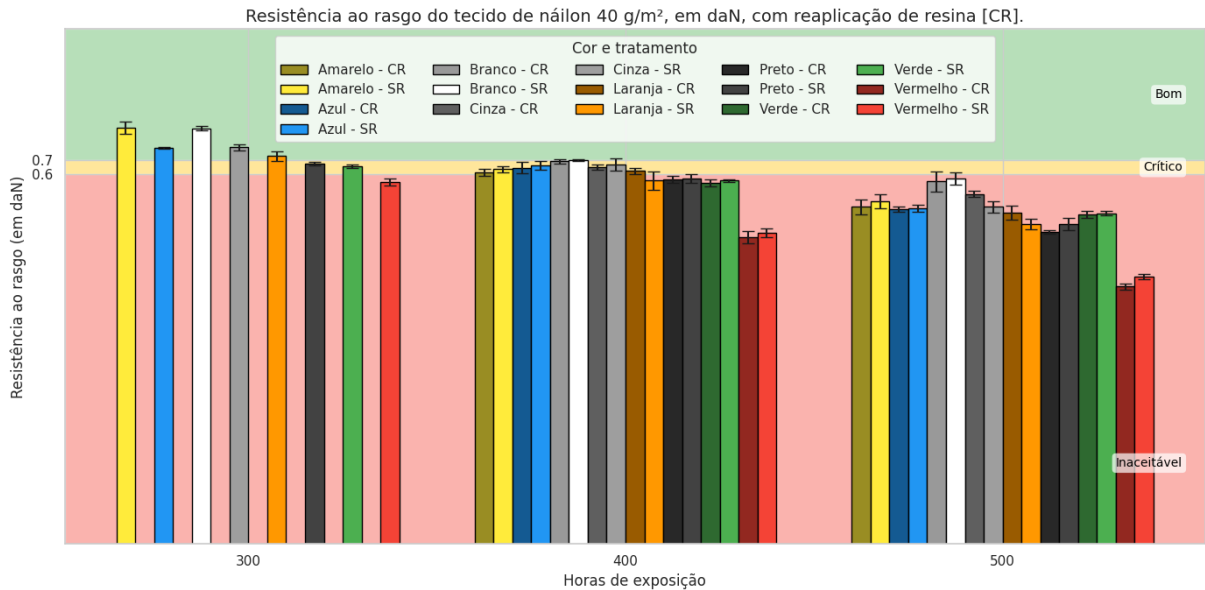


Figura 18 - Resistência ao rasgo das amostras de tecidos de náilon ripstop resinado de 40 g/m<sup>2</sup>, com (CR) e sem (SR) reaplicação de resina, em função do tempo de exposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A reaplicação de silicone não proporcionou melhorias quanto à resistência ao rasgo.

### 5.2.3 Correlação entre irradiação acumulada e propriedades físicas e mecânicas

Para investigar a relação entre a radiação solar e a degradação do náilon, uma análise de correlação foi conduzida, comparando a irradiância solar acumulada com as propriedades físicas (permeabilidade ao ar) e mecânicas (resistência ao rasgo). Essa abordagem busca determinar se a degradação segue uma tendência linear ou não linear em função da exposição. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) resultantes são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para permeabilidade ao ar e resistência ao rasgo em tecidos de nylon de diferentes cores e gramaturas.

| Gramatura | Cor      | $R^2$<br>(permeabilidade ao ar) | $R^2$<br>(resistência ao rasgo) |
|-----------|----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 29        | Amarelo  | 0,53                            | 0,94                            |
| 29        | Azul     | 0,53                            | 0,89                            |
| 29        | Branco   | 0,58                            | 0,89                            |
| 29        | Laranja  | 0,69                            | 0,87                            |
| 29        | Vermelho | 0,56                            | 0,92                            |
| 40        | Amarelo  | 0,61                            | 0,96                            |
| 40        | Azul     | 0,57                            | 0,93                            |
| 40        | Branco   | 0,56                            | 0,89                            |
| 40        | Cinza    | 0,55                            | 0,97                            |
| 40        | Laranja  | 0,58                            | 0,91                            |
| 40        | Preto    | 0,62                            | 0,91                            |
| 40        | Verde    | 0,74                            | 0,92                            |
| 40        | Vermelho | 0,79                            | 0,94                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, a análise de correlação revelou que a resistência mecânica, mensurada pelo Bettometer, apresenta uma forte relação com a irradiância solar acumulada, independentemente da cor ou gramatura dos tecidos. Em contraste, a permeabilidade ao ar demonstrou uma correlação significativamente mais fraca. Isso pode ser atribuído à maior variabilidade estrutural do tecido, que não depende apenas da degradação química, mas também de rearranjos físicos das fibras. Conseqüentemente, a resistência mecânica emerge como o parâmetro mais robusto e confiável para avaliar a degradação induzida pela radiação solar. A permeabilidade ao ar, embora útil para complementar a análise, mostrou ser menos consistente como um indicador isolado. Esta distinção é crucial para a escolha de parâmetros de monitoramento eficazes, especialmente em tecidos técnicos como os usados em parapentes, que são submetidos a condições ambientais extremas.

### 5.3 ANÁLISES DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO TECIDO

#### 5.3.1 Espectroscopia: evidência molecular da degradação

Para a adequada compreensão dos efeitos da exposição à irradiação solar, é imprescindível a realização de uma caracterização espectral detalhada das

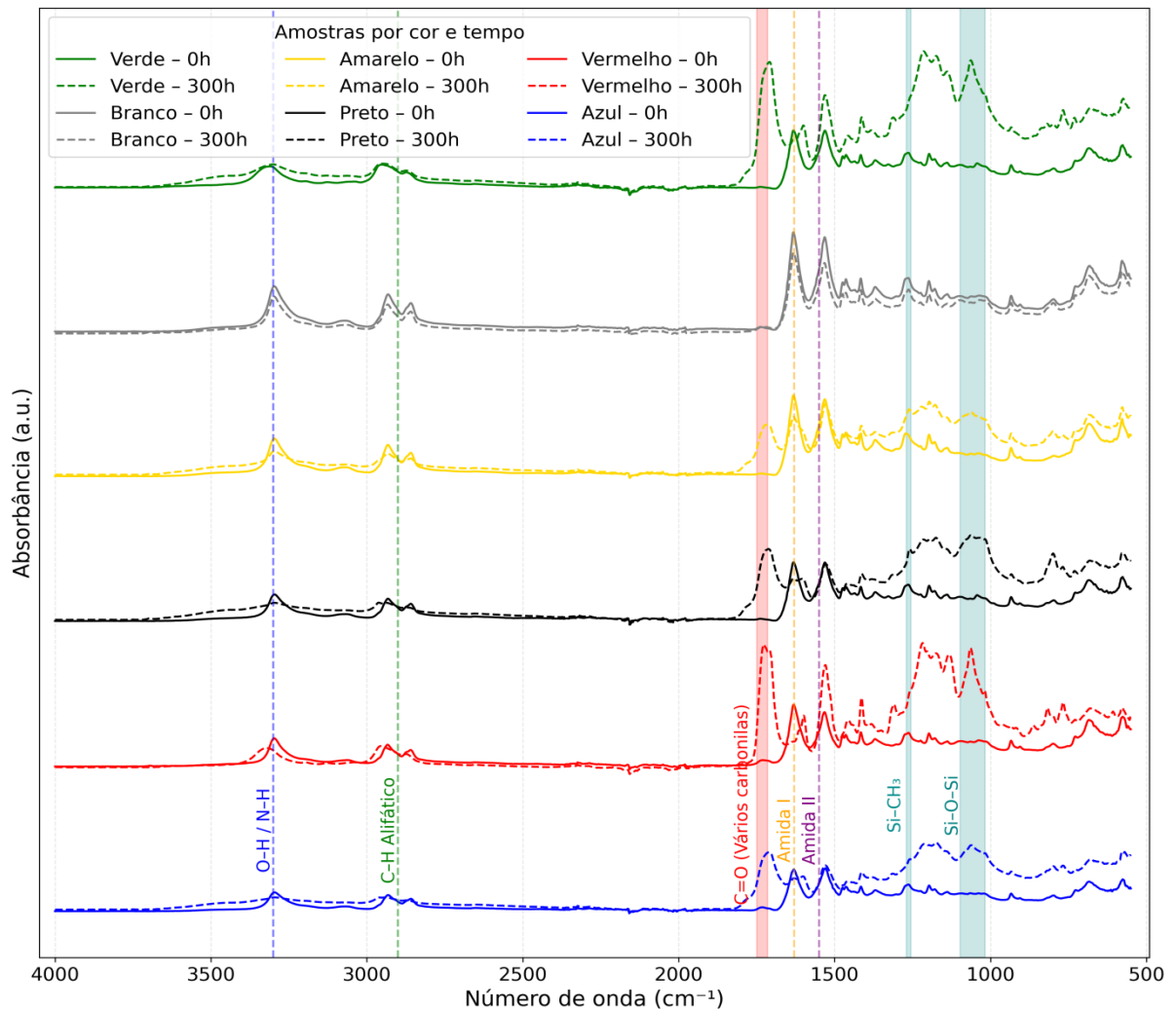
amostras, segmentadas por cor, nos estados não exposto (0 h) e exposto (300 h). Considerando o elevado tempo demandado pelos procedimentos laboratoriais e a necessidade de otimização dos processos experimentais, os testes subsequentes foram aplicados apenas às amostras de 40 g/m<sup>2</sup>.

O tempo de 300 horas foi selecionado por representar o limiar aceitável para as condições de uso funcional do tecido, conforme demonstrado pelos resultados físico-mecânicos.

A técnica de FTIR-ATR é reconhecida por sua elevada sensibilidade na detecção de alterações estruturais em polímeros, permitindo identificar mudanças na composição molecular resultantes da degradação fotoquímica (Edge, 2006).

Os espectros de referência, a "impressão digital" da composição química original, estão apresentados por coloração na Figura 19.

Figura 19 - Comparação dos espectros FTIR-ATR de tecidos ripstop de nylon 6,6, com revestimentos de poliuretano e silicone, por cor, antes (0 h) e após (300 h) a exposição à radiação solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A identificação e atribuição das bandas de absorção características dos componentes poliméricos, náilon 6,6, poliuretano e silicone, bem como daquelas associadas a produtos de degradação, foram realizadas com base em referências consolidadas da literatura científica especializada. Essa análise fundamenta a interpretação das transformações estruturais observadas nos espectros FTIR-ATR. As principais bandas espectrais detectadas, juntamente com suas respectivas atribuições vibracionais e origens químicas, estão sistematizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Bandas infravermelhas características e referências.

| Número de onda (cm <sup>-1</sup> ) | Atribuição   | Referência                                     |
|------------------------------------|--|--|
| ~3300                              | Estiramento O–H/N–H; alterações na intensidade sugerem oxidação ou absorção de umidade.                                      | (Rossbach, 1977)                               |
| ~2900                              | Estiramento C–H dos grupos CH <sub>2</sub> /CH <sub>3</sub> ; intensidade reduzida pode indicar degradação ou reorganização. | (Šebek <i>et al.</i> , 2013)                   |
| ~1750–1740                         | Estiramento C=O - Ésteres (a influência do oxigênio adjacente aumenta a frequência).   | (Bellamy, 1975)                                |
| ~1730                              | Estiramento C=O; de vários carbonilos. Intensidade mais alta indica oxidação.  | (Colthup; Daly; Wiberley, 1990; Bellamy, 1975) |
| ~1715                              | Estiramento C=O - Cetonas (frequência ligeiramente mais baixa do que os ésteres).  | (Colthup; Daly; Wiberley, 1990)                |
| ~1630                              | Amida I - Relacionada à integridade das ligações Amida; uma queda na intensidade sugere degradação.                          | (Rossbach, 1977)                               |
| ~1550                              | Amida II - Complementa a Amida I na avaliação da integridade estrutural do nylon e do poliuretano.                           | (Rossbach, 1977)                               |
| ~1270–1255                         | Flexão simétrica de CH <sub>3</sub> em Si–CH <sub>3</sub> ; variação de intensidade sugere oxidação.                         | (Centeno; Johnson, 1993)                       |
| ~1097–1017                         | Estiramento de Si–O–Si; variação de intensidade pode sugerir oxidação ou rearranjo da rede.                                  | (Graiver; Farminer; Narayan 2003)              |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3.2 Bandas de absorção: considerações espectrais

Com base na atribuição das bandas espectrais da Tabela 5, as principais regiões do espectro FTIR-ATR são discutidas a seguir. Essas bandas correspondem a assinaturas vibracionais específicas de grupos funcionais. As variações em sua intensidade, largura ou posição ao longo da exposição fornecem evidências moleculares das transformações físico-químicas.

Dentre essas bandas, destacam-se:

- **~3300 cm<sup>-1</sup>** (Estiramento O–H/N–H): banda característica dos grupos hidroxila (–OH) e amida (–NH). Variações em sua intensidade podem estar associadas à oxidação ou à absorção de umidade (Rossbach, 1977).
- **~2900 cm<sup>-1</sup>** (Estiramento C–H alifático): banda que indica a presença de grupos metilênicos (–CH<sub>2</sub>–) e metila (–CH<sub>3</sub>) (Bellamy, 1975; Colthup; Daly; Wiberley, 1990). Uma diminuição em sua intensidade pode sugerir alterações estruturais (Šebek *et al.*, 2013). Variações na intensidade e frequência do estiramento C-H podem refletir tanto fenômenos de estabilização quanto reorganização estrutural, evidenciando o comportamento diferenciado de moléculas orgânicas em ambientes variados (Matsuura *et al.*, 2003).
- **~1750–1715 cm<sup>-1</sup> (Carbonilas – C=O)**: as bandas de estiramento da carbonila (C=O) são marcadores sensíveis de degradação oxidativa em polímeros, com frequências típicas variando de ~1750–1740 cm<sup>-1</sup> (ésteres) a ~1715 cm<sup>-1</sup> (cetonas), influenciadas pelo ambiente químico (Bellamy, 1975; Colthup; Daly; Wiberley, 1990). A banda em torno de **1730 cm<sup>-1</sup>** é amplamente utilizada para monitorar a formação de grupos oxidativos, como aldeídos, ácidos carboxílicos e cetonas, além de grupos uretano e ésteres já presentes na matriz (Colthup; Daly; Wiberley, 1990; La Mantia; Dintcheva, 2004). No náilon 6,6, a oxidação térmica pode deslocar essa banda para **~1713 cm<sup>-1</sup>**, sugerindo a formação de carbonilas insaturadas (Murty; Yehl, 1990). Em geral, mecanismos térmicos e foto-oxidativos promovem a quebra de cadeias e a geração de espécies carbonílicas estáveis (Carroccio *et al.*, 2007).
- **~1630 cm<sup>-1</sup>** (Amida I): banda proeminente no náilon 6,6 e no poliuretano, relacionada à integridade das ligações amida e ao estiramento N-H (Rossbach, 1977). Uma queda em sua intensidade pode indicar degradação.
- **~1550 cm<sup>-1</sup>** (Amida II): complementa a banda Amida I na avaliação da integridade estrutural do náilon e do poliuretano, sendo atribuída à deformação N-H e estiramento C-N (Rossbach, 1977).
- **~1270–1255 cm<sup>-1</sup>** (Vibração de dobramento simétrico dos grupos metil [–CH<sub>3</sub>] nas ligações Si–CH<sub>3</sub>): banda crítica para a análise do silicone (PDMS). Uma redução em sua intensidade pode significar a oxidação dos grupos metil (Centeno; Johnson, 1993; Graiver; Farminer; Narayan, 2003).

- **~1097–1017 cm<sup>-1</sup>** (Vibração de estiramento assimétrico da ligação siloxano (Si-O-Si)): bandas cruciais para a identificação da rede siloxânica, que forma a cadeia principal do PDMS (Centeno; Johnson, 1993). Diminuição em sua intensidade pode indicar processos de despolimerização decorrentes da hidrólise das ligações Si-O-Si ou degradação da cadeia principal (Graiver; Farminer; Narayan, 2003).

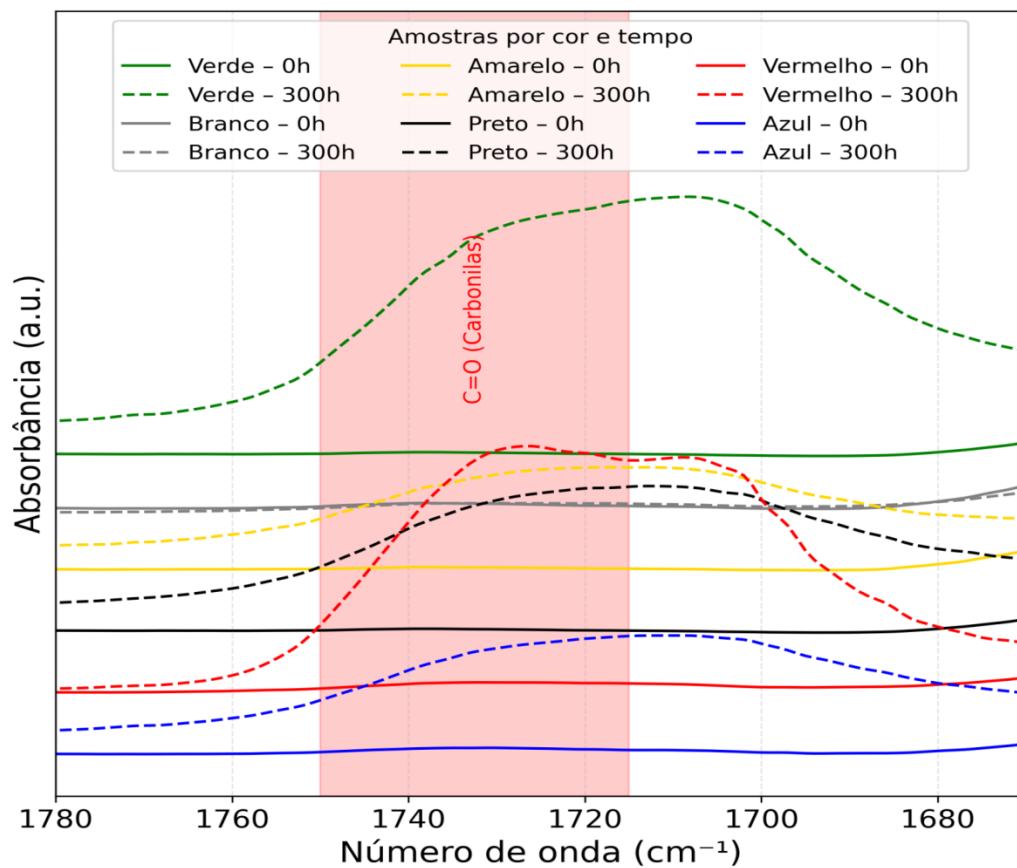
A seguir, são apresentadas e discutidas as principais alterações espectrais observadas nas regiões de interesse, abrangendo as bandas associadas a grupos carbonílicos, alifáticos, amidas e à estabilidade do revestimento de silicone.

### **5.3.3 Alterações na região carbonílica (C=O)**

Com base nas análises espectroscópicas da Figura 20, após 300 horas de exposição, observou-se um aumento sistemático na intensidade da banda de estiramento da carbonila (~1730 cm<sup>-1</sup>) nas amostras coloridas. Esse incremento indica processos progressivos de foto-oxidação, impulsionados pela energia solar (Geuskens; David, 1979). Nos sistemas poliméricos à base de poliuretano (PU), tal intensificação pode ser atribuída a diversas rotas oxidativas, com destaque para a oxidação de segmentos alifáticos das cadeias de poliálcool e diisocianato, que leva à formação de compostos carbonílicos, como cetonas, aldeídos e ácidos carboxílicos (Schultze, 1973).

Notavelmente, a amostra de cor branca manteve a intensidade da banda de carbonila praticamente inalterada, indicando maior resistência à oxidação fotoinduzida. Essa estabilidade pode estar relacionada à presença de pigmentos inorgânicos com propriedades fotoprotetoras, que atenuam os efeitos da radiação incidente.

Figura 20 - Evolução das bandas C=O-H/N-H ( $\sim 1715-1740\text{ cm}^{-1}$ ) após 300 horas de exposição à radiação solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que, durante a degradação fotoinduzida, formam-se inicialmente hidroperóxidos, intermediários instáveis da foto-oxidação, que se decompõem gerando radicais livres e produtos oxigenados. Esses subprodutos aceleram a formação de grupos carbonílicos e outras funcionalidades oxidativas, intensificando o envelhecimento do polímero (Lemaire; Arnaud; Gardette, 1983).

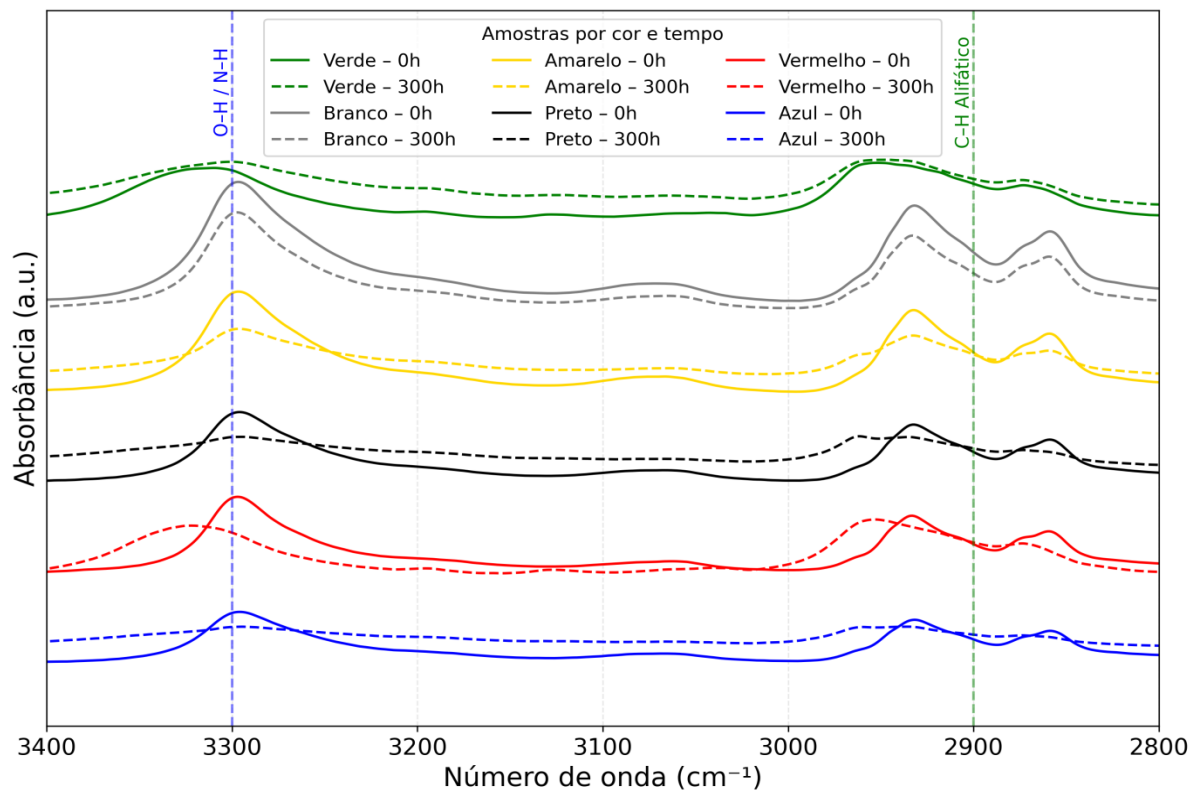
Embora o presente estudo enfoque os mecanismos intrínsecos de degradação oxidativa no sistema náilon 6,6, PU e silicone, cabem destacar que a presença de aditivos estabilizantes, como absorvedores de UV e filtros de luz, pode reduzir significativamente a taxa de foto-oxidação, mitigando a formação de hidroperóxidos e inibindo reações de propagação radicalar, contribuindo para a extensão da vida útil dos materiais poliméricos (Winslow, 1977).

### 5.3.4 Alterações nas regiões alifáticas (N-H/O-H) e (C-H)

As análises espectroscópicas da Figura 21 evidenciaram uma diminuição progressiva na intensidade das bandas atribuídas aos grupos N-H e O-H. A amostra verde, no entanto, apresentou um pequeno aumento na banda N-H/O-H, enquanto as demais diminuíram. A diminuição da intensidade é um indicativo significativo da perda progressiva da capacidade do sistema polimérico de estabelecer interações por ligações de hidrogênio (Gilbert, 2017; Darmon; Sutherland, 1949), além de refletir alterações no estado de hidratação.

Na banda alifática (C-H), a amostra branca se destacou pela redução de intensidade, o que sugere uma degradação mais avançada das cadeias hidrocarbonadas.

Figura 21 - Evolução das bandas O-H/N-H ( $\sim 3300\text{ cm}^{-1}$ ) e C-H ( $\sim 2900\text{ cm}^{-1}$ ) após 300 horas de exposição à irradiação solar.



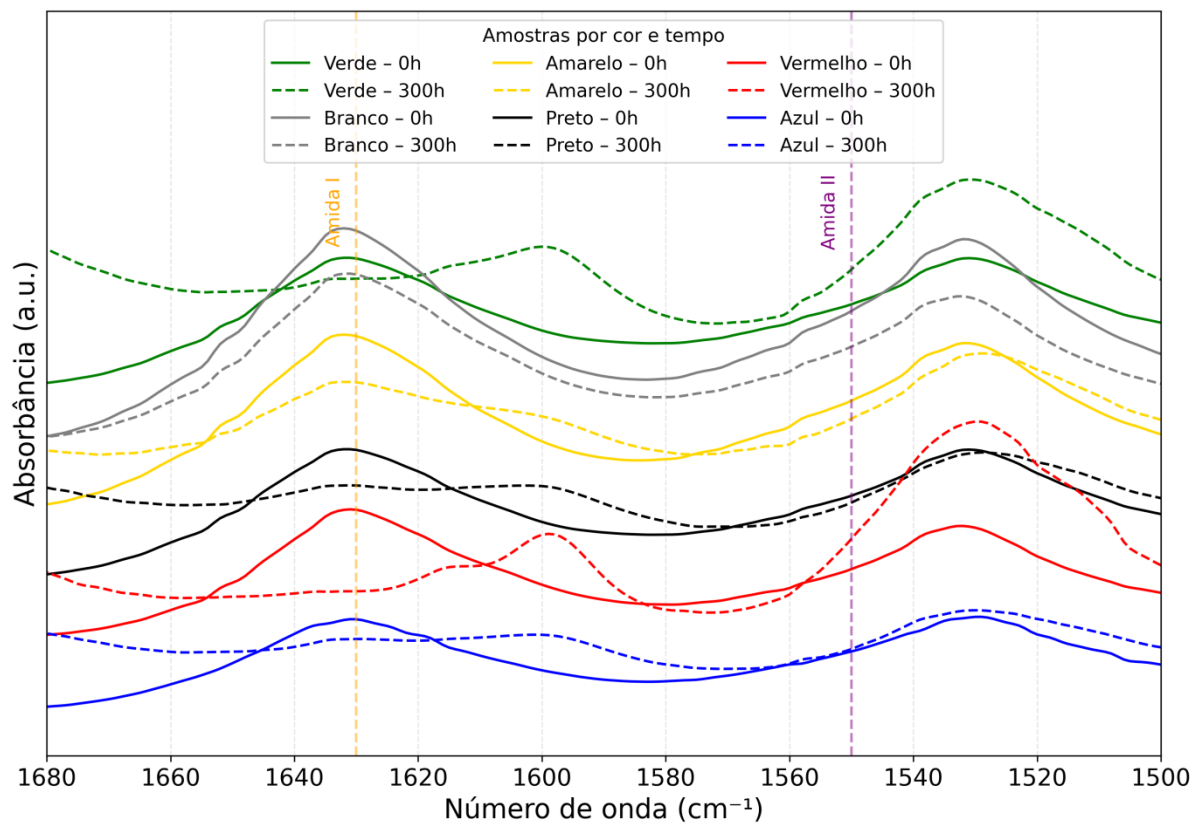
A redução da banda C-H na amostra branca sugere uma degradação mais avançada das cadeias hidrocarbonadas, possivelmente causada pela abstração de

hidrogênio por radicais peroxila, etapa inicial da oxidação polimérica (Macknight; Yang, 2007). Esse processo leva à formação de hidroperóxidos instáveis, cuja decomposição gera grupos carbonila e promove a quebra da cadeia (Nakayama; Ino; Matsubara, 1969; Matsubara; Magill, 1973).

### 5.3.5 Degradação do náilon 6,6: evidências das bandas de amida

As bandas características da Amida I ( $\sim 1630\text{ cm}^{-1}$ ) e Amida II ( $\sim 1550\text{ cm}^{-1}$ ) apresentaram variações espectrais significativas após 300 horas de exposição, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Evolução das bandas Amida I ( $\sim 1630\text{ cm}^{-1}$ ) e Amida II ( $\sim 1550\text{ cm}^{-1}$ ).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A banda Amida I apresentou discreta redução de intensidade em todas as amostras coloridas. Em contraste, a banda Amida II revelou comportamento mais heterogêneo. Notadamente, a amostra vermelha e verde evidenciou um aumento significativo, o que pode indicar uma intensificação da degradação nessas

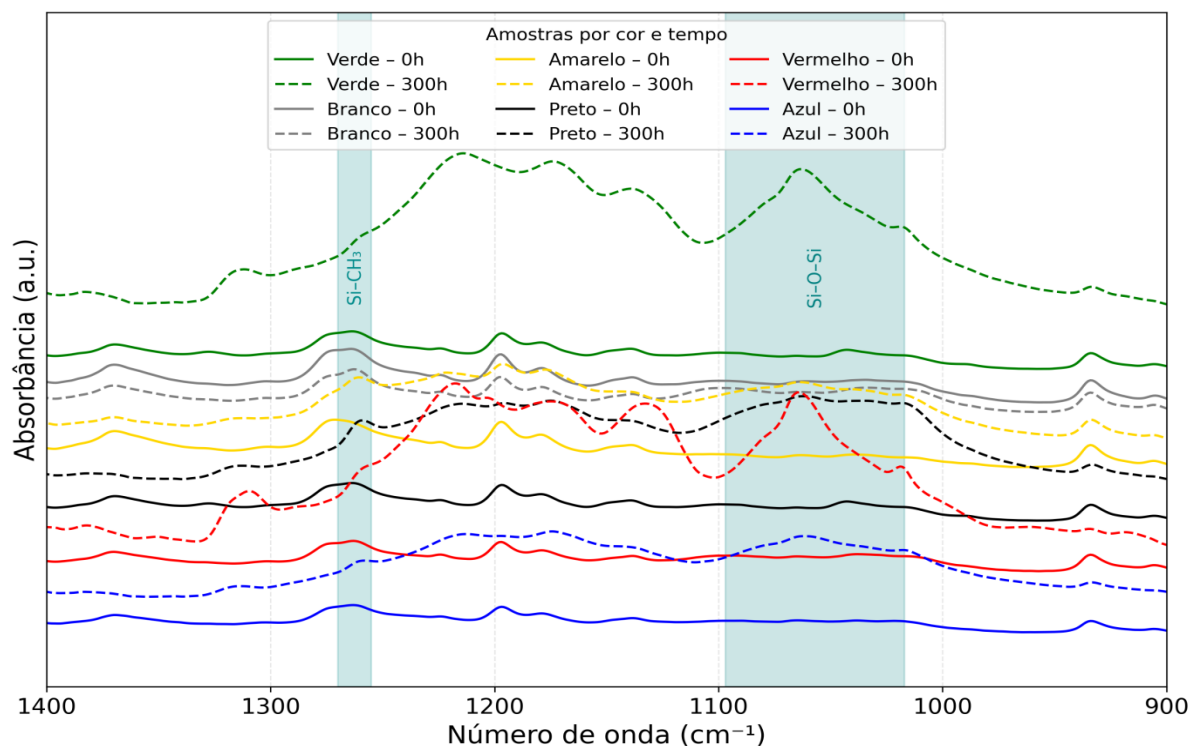
colorações. Por outro lado, a amarela, preta e azul manteve relativa estabilidade espectral nessa região, sugerindo possível efeito protetor. A amostra branca, por sua vez, exibiu redução na banda Amida II, comportamento compatível com menor absorção da radiação solar incidente e, conseqüentemente, com degradação menos acentuada da matriz polimérica (Geuskens; David, 1979; Winslow, 1977).

Esses resultados evidenciam um padrão de degradação seletiva influenciado pelas propriedades ópticas dos pigmentos, ao mesmo tempo em que ressaltam a relevância de fatores intrínsecos ao material, como a presença de aditivos e as características físico-químicas do substrato têxtil, os quais podem impactar significativamente os perfis espectrais observados por FTIR (Zohdi *et al.*, 2015).

### 5.3.6 Revestimento de silicone: estabilidade e interações

A análise dos espectros de silicone revelou alterações significativas na região da impressão digital. A maioria das formulações apresentou aumento na intensidade nas bandas Si–O–Si e Si–CH<sub>3</sub>, destacando-se as amostras verde e vermelha, o que indica processos de degradação estrutural (Figura 23).

Figura 23 - Região de impressão digital (900–1400 cm<sup>-1</sup>): bandas características de Si–O–Si e Si–CH<sub>3</sub>.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A radiação UVB (280–340 nm) pode causar a ruptura das ligações Si–O–Si e Si–CH<sub>3</sub> no silicone, levando à formação de produtos degradados como o cicloquartossano D4 após exposições prolongadas (Wang *et al.*, 2021). O aumento da intensidade das bandas vibracionais observadas nas amostras, especialmente nas cores verde e vermelha, indica processos de degradação estrutural associados à cisão de cadeia, como também processos de reticulação ou reorganização estrutural do polímero. Essa reorganização pode até gerar uma rede mais estável ou compacta, mantendo ou até melhorando propriedades como a permeabilidade ao ar

Além disso, diferenças na coloração influenciam a absorção de radiação UV e o balanço térmico do material. Pigmentos como o dióxido de titânio, presentes em formulações brancas, podem reduzir a degradação ao refletir a radiação UV, enquanto as amostras coloridas absorvem mais energia, acelerando a degradação (Xiao *et al.*, 2008; Mehr *et al.*, 2018).

### **5.3.7 Avaliação comparativa da estabilidade e degradação das colorações**

As análises espectroscópicas evidenciam diferenças na resistência à degradação entre as colorações após 300 horas de exposição à radiação solar.

Na região carbonílica (C=O), observou-se aumento da banda de estiramento (~1730 cm<sup>-1</sup>) nas amostras coloridas, indicando processos de foto-oxidação, enquanto a amostra branca manteve essa banda praticamente estável, sugerindo maior resistência atribuída à presença de pigmentos inorgânicos com efeito fotoprotetor.

Nas regiões alifáticas (N–H/O–H e C–H), a amostra branca apresentou maior redução na banda C–H, indicativa de degradação das cadeias hidrocarbonadas, ao passo que a amostra verde mostrou leve aumento nas bandas N–H/O–H, refletindo um comportamento distinto no equilíbrio hídrico e nas interações intermoleculares.

No náilon 6,6, as bandas Amida I e II revelaram variações específicas: vermelho e verde evidenciaram aumento na banda Amida II, sugerindo maior alteração estrutural, enquanto amarelo, preto e azul apresentaram estabilidade relativa, e a amostra branca mostrou menor absorção de radiação, associada a menor degradação.

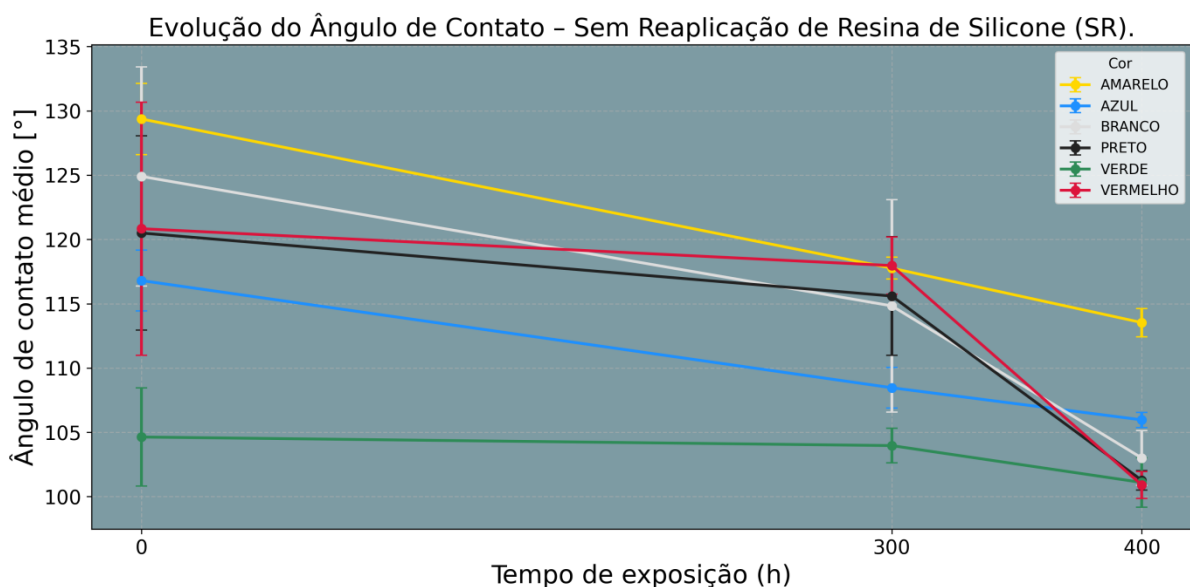
Quanto ao revestimento de silicone, as amostras verde e vermelha destacaram-se pelo aumento das bandas Si–O–Si e Si–CH<sub>3</sub>, indicando modificações estruturais mais pronunciadas, em contraste com a coloração branca.

Esta avaliação reforça o papel relevante dos pigmentos e aditivos na modulação da absorção de radiação UV e na durabilidade dos materiais, sendo essencial para otimizar formulações com maior vida útil sob condições ambientais.

#### 5.4 GONIOMETRIA: AUMENTO DA POLARIDADE SUPERFICIAL

A análise dos ângulos de contato indicou alterações significativas na molhabilidade das superfícies. Observou-se uma redução progressiva dos ângulos entre 0 e 300 horas, o que sugere um aumento da polaridade superficial (Figura 24). Destaca-se, no intervalo de 300 a 400 horas, uma redução mais acentuada dos ângulos nos tecidos de coloração vermelha, branca e preta, o que indica uma tendência à diminuição da hidrofobicidade em decorrência de processos de degradação superficial.

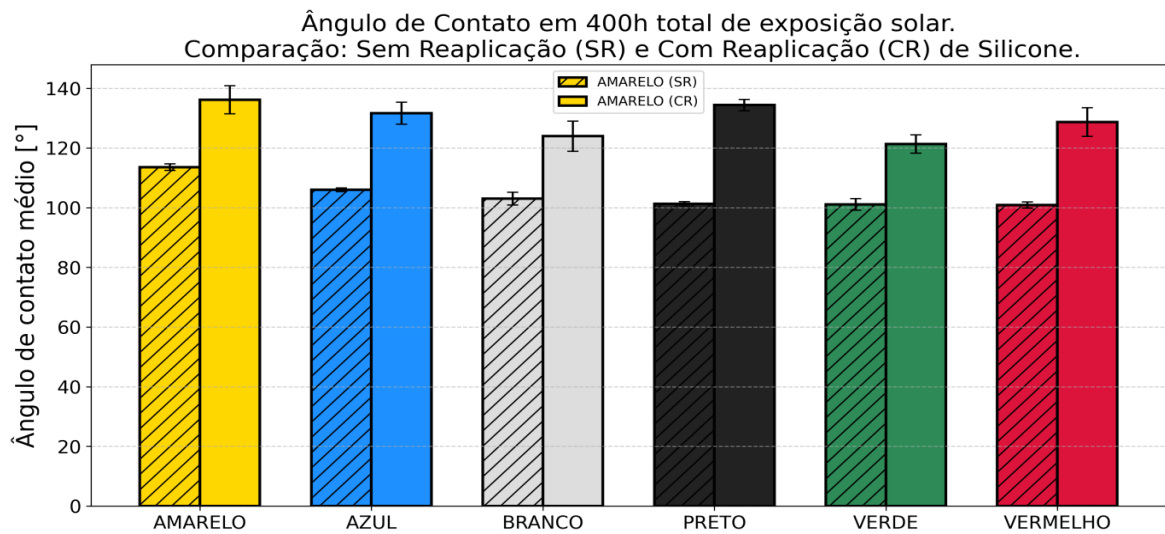
Figura 24 - Variação do ângulo de contato da água em amostras (0h, 300h, 400h) sem reaplicação de resina de silicone.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a reaplicação de silicone, as amostras apresentaram aumento nos ângulos de contato (Figura 25).

Figura 25 - Ângulo de contato da água em amostras após 400h: comparativo entre Sem Reaplicação (SR) e Com Reaplicação (CR) de resina de silicone.

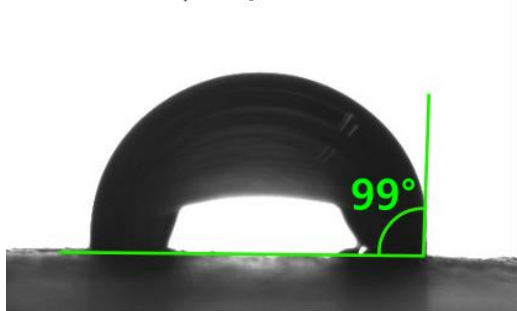


Fonte: Elaborado pelo autor.

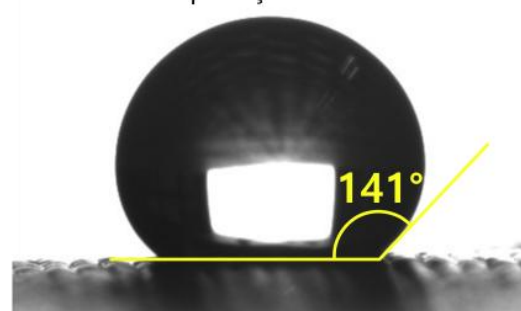
A Figura 26 apresenta imagens obtidas por goniometria, as quais evidenciam a melhoria da hidrofobicidade nas amostras tratadas, confirmando os resultados quantitativos obtidos.

Figura 26 - Ângulo de contato ( $\theta$ ) após 400h: comparativo entre Sem Reaplicação (SR) e Com Reaplicação (CR) de resina de silicone.

(a) Tecido à 400h sob irradiação solar, sem reaplicação de silicone.



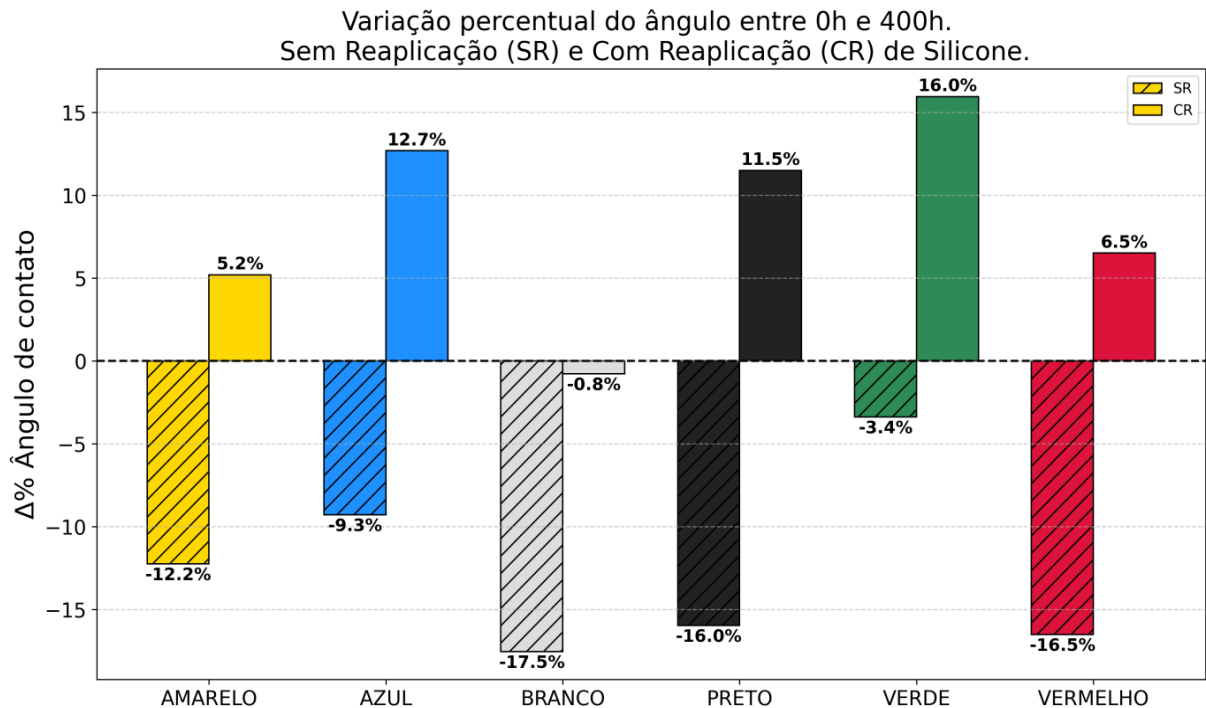
(b) Tecido à 400h sob irradiação solar, com reaplicação de silicone.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após 400 horas de exposição, as amostras sem reaplicação de resina apresentaram redução média de ~15% nos ângulos de contato, exceto a verde, com queda de apenas 3%. Com a reaplicação do silicone, todas as colorações — exceto a branca — superaram os valores iniciais, destacando-se a verde, com aumento superior a 16% em relação ao valor de referência (Figura 27).

Figura 27 - Variação percentual do ângulo de contato da água (0h a 400h): comparativo entre amostras Sem Reaplicação (SR) e Com Reaplicação (CR).



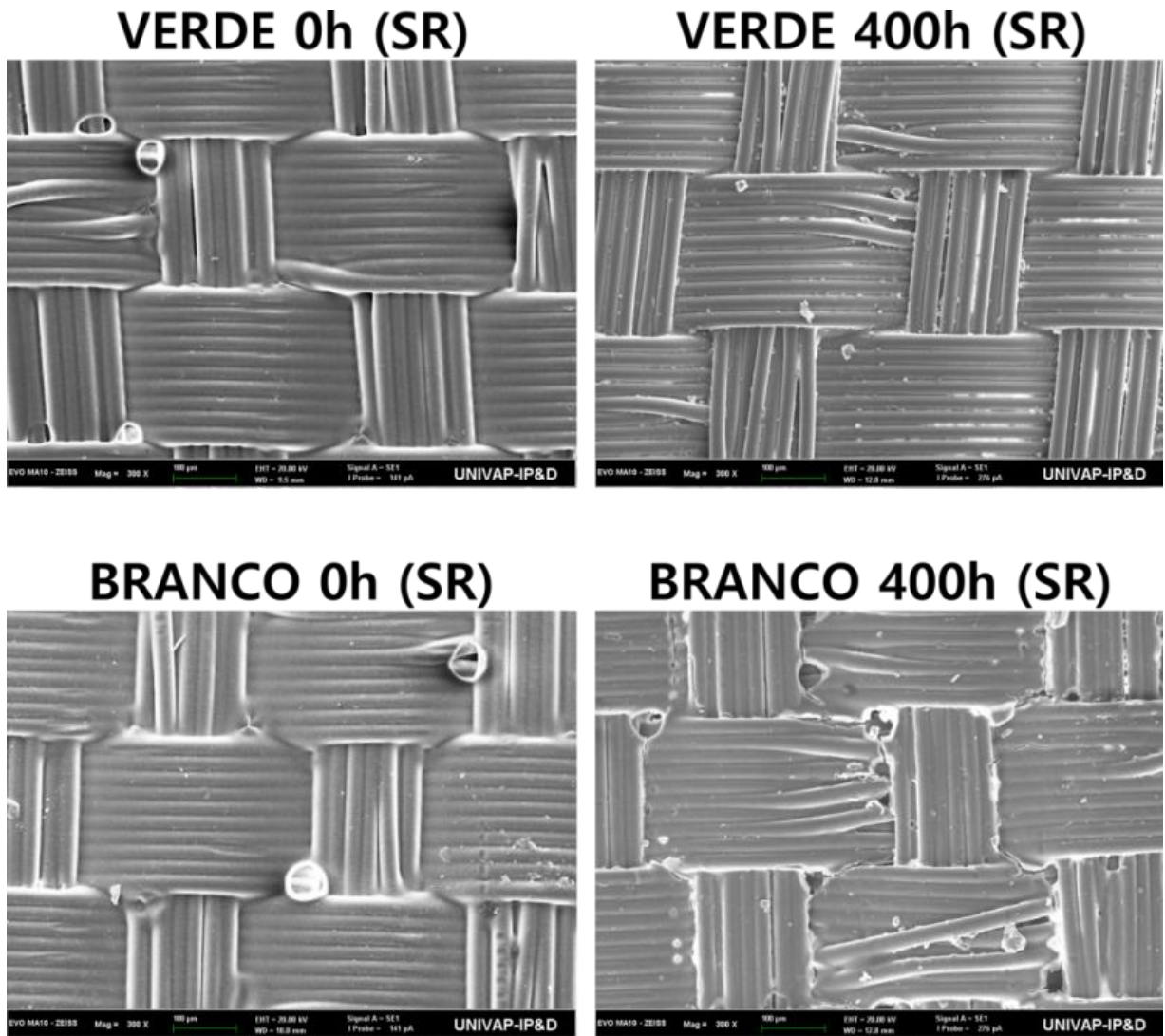
Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses resultados demonstram que a reaplicação da resina de silicone pode ser eficaz na restauração das propriedades hidrofóbicas dos tecidos.

## 5.5 EVIDÊNCIAS VISUAIS DA DEGRADAÇÃO: MEV E COLORIMETRIA

A Microscopia Eletrônica identificou alterações morfológicas nos tecidos expostos à radiação solar (Figura 28), o que está de acordo com os resultados de permeabilidade ao ar e goniometria. A análise dos tecidos verde e branco, após 400 horas, mostrou diferentes padrões de degradação: o verde manteve um melhor desempenho, enquanto o branco apresentou microfissuras.

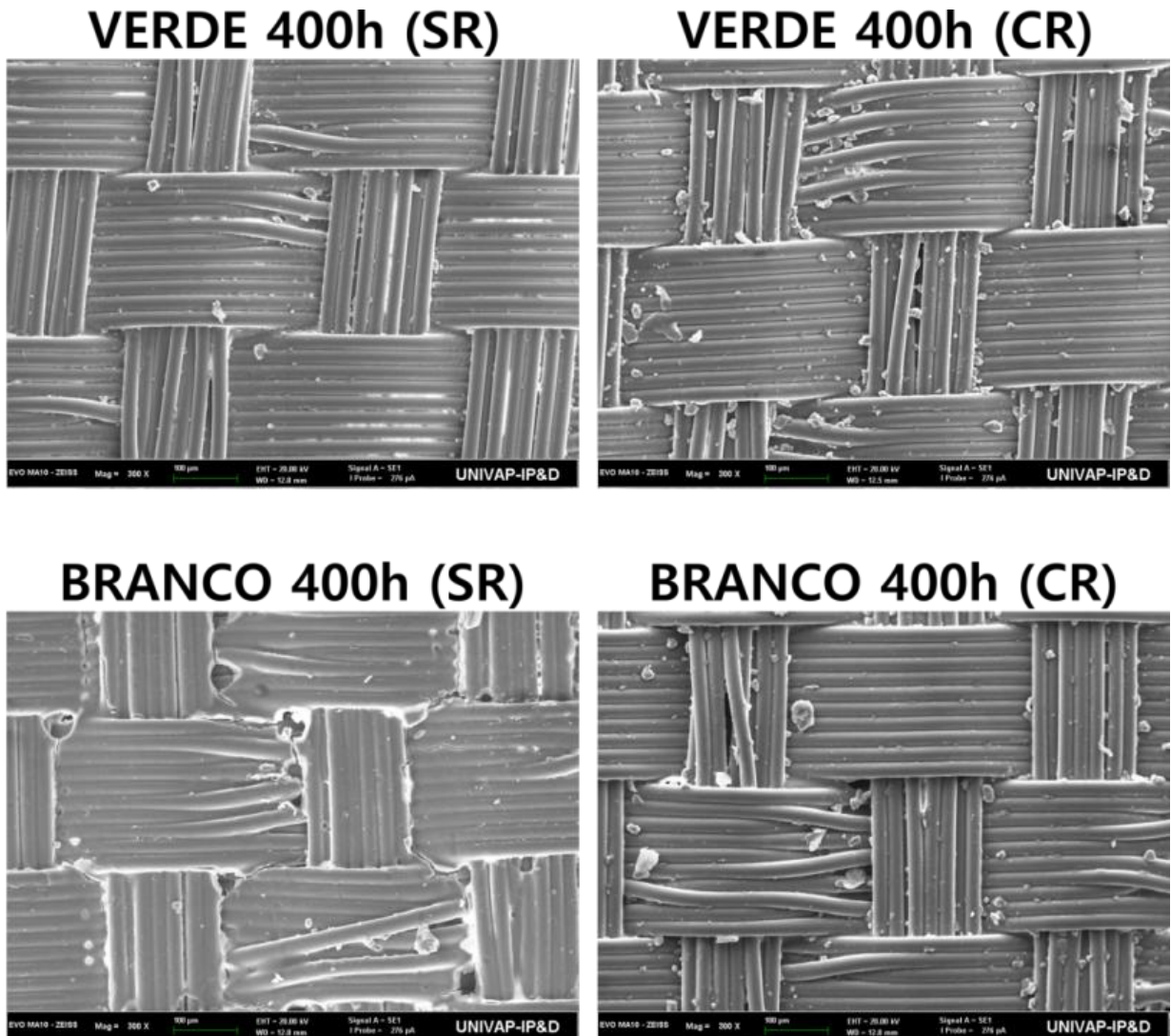
Figura 28 - Degradação estrutural de tecidos de parapente (verde e branco) por MEV em 0h e 400h de exposição solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A replicação da resina de silicone, como evidenciado nas micrografias (Figura 29), conferiu apenas uma aparência superficial de revitalização. No entanto, essa intervenção não se mostrou eficaz na restauração da permeabilidade ao ar, indicando que a degradação estrutural não foi revertida.

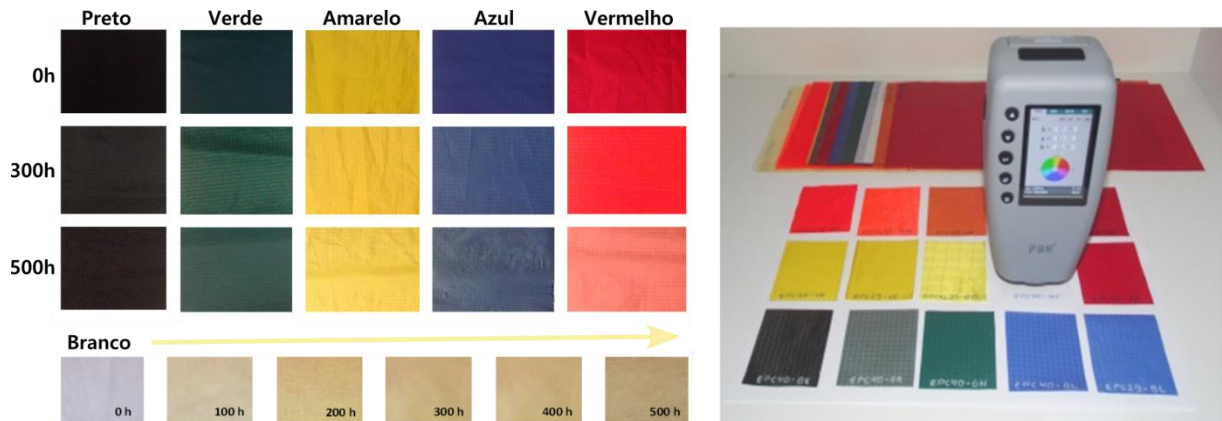
Figura 29 - Micrografias da superfície de tecidos Sem (SR) e Com Reaplicação de silicone (CR) nas amostras de tecido (Verde e Branco) em 400h de exposição solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teste de cor possibilitou a avaliação das alterações visuais decorrentes do desbotamento dos tecidos, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Avaliação da alteração de cor dos tecidos: (a) variação visual ao longo do tempo; e (b) colorímetro digital.



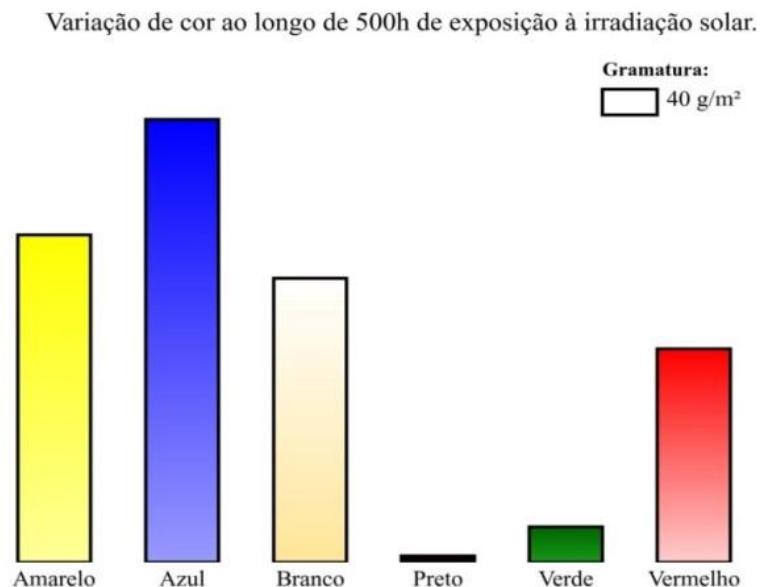
(a) Variação visual da cor ao longo do período de exposição.

(b) Colorímetro digital, mod. AS-X5, marca Aicevoos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação da solidez da cor dos tecidos de náilon ripstop resinado, após 500 horas de exposição à irradiação solar, evidenciou variações significativas na perda de intensidade cromática e nos efeitos visuais de desbotamento, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Fotodegradação por irradiação solar de tecidos de náilon ripstop resinado, em função do tempo de exposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A variação perceptível da cor ( $\Delta E$ ) está relacionada à degradação fotoquímica do polímeros, fenômeno amplamente associado tanto à estrutura do material quanto

ao tipo de corante empregado (Kämpf, 1990; Marek; Lerch, 1965), evidenciado pela maior suscetibilidade da cor azul e o melhor desempenho de tonalidades como verde e preto.

No tecido branco é facilitada a visualização do amarelamento associado à formação de compostos dicarbonílicos durante a fotodegradação. Segundo Marek e Lerch (1965), “compostos dicarbonílicos [...] podem ser considerados intermediários no amarelecimento de poliamidas fotodegradadas”.

Esses resultados ressaltam a importância da escolha adequada de pigmentos e formulações de resina para otimizar a resistência à irradiação solar. Parâmetros como a composição da matriz polimérica, a presença de aditivos e a química dos corantes são determinantes para a estabilidade fotoquímica (Groeneveld *et al.*, 2023).

Cabe enfatizar que, a estabilidade de cor não pode ser dissociada de uma complexa interação de fatores, incluindo a composição do substrato têxtil, a presença de aditivos específicos (por exemplo, delustrantes como  $\text{TiO}_2$ ), a natureza química dos corantes empregados e as condições ambientais de exposição, notadamente umidade relativa, temperatura e o espectro da irradiação solar incidente. Esses elementos, de maneira sinérgica, determinam a longevidade funcional e estética dos materiais têxteis (Eames, 2023; Guan *et al.*, 2023).

Apesar dessas vulnerabilidades, avanços recentes em corantes, modificações químicas e acabamentos funcionais, como o uso de nanopartículas, têm ampliado as possibilidades de melhoria da estabilidade cromática, mesmo em tecidos tradicionalmente mais sensíveis (Liu, 2018).

## 6 CONCLUSÃO

Esta dissertação atingiu de forma plena o objetivo de investigar a fotodegradação de tecidos técnicos de náilon 6,6 ripstop, revestidos com poliuretano e silicone, submetidos à exposição natural à radiação solar. Os resultados confirmaram que a degradação ocorre de maneira relativamente acelerada, especialmente entre 300 e 400 horas de exposição, comprometendo propriedades críticas como a resistência ao rasgo e a permeabilidade ao ar. Evidenciou-se que esse processo é multifatorial, envolvendo alterações físico-mecânicas, químicas, visuais e morfológicas, e que a cor exerce papel determinante na taxa de deterioração: o verde apresentou maior estabilidade, enquanto o vermelho se mostrou mais suscetível.

Do ponto de vista científico, o estudo amplia a compreensão dos mecanismos de fotodegradação em sistemas poliméricos complexos, combinando análises mecânicas, químicas, morfológicas e de superfície em um modelo integrado. Do ponto de vista aplicado, oferece parâmetros de referência relevantes para fabricantes, entidades reguladoras e pilotos, ao evidenciar que a perda de desempenho ocorre em intervalos curtos de exposição solar e exige protocolos mais rigorosos de inspeção, manutenção e descarte. Também foi demonstrado que a reaplicação de silicone pode atuar apenas como medida paliativa para restauração da hidrofobicidade, mas não prolonga a vida útil estrutural do tecido.

Ainda que relevantes, estes achados não encerram a temática. Ao contrário, abrem caminhos para investigações futuras, como a realização de ciclos de envelhecimento mais longos em câmaras climáticas controladas, o uso de ensaios que simulem esforços mecânicos cíclicos de voo, o desenvolvimento de índices espectrais padronizados via FTIR, a integração de colorimetria e MEV com inteligência artificial e a formulação de novos revestimentos híbridos ou funcionais capazes de oferecer maior resistência à radiação solar.

Em síntese, a degradação dos tecidos de náilon 6,6 com poliuretano e silicone é inevitável, mas pode ser melhor compreendida, monitorada e mitigada. O conhecimento produzido aqui contribui para a ciência dos materiais e para a prática do voo livre, em que a preservação da integridade do velame se traduz diretamente na preservação da vida.

Por fim, a principal lição deste estudo pode ser expressa na seguinte reflexão:

“O melhor material não é o mais vistoso ou proclamado como superior, mas o mais previsível — aquele que, ainda que frágil, permite antecipar suas falhas e administrar sua manutenção ou substituição, revelando-se, assim, mais seguro que a resistência ilusória.”

## REFERÊNCIAS

- ABEYWICKRAMA, N. *et al.* The Design and Development of Woven Textile Solar Panels. **Materials**, v. 16, n. 11, p. 4129, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16114129>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- ADAMS, G.; BUDDEN, G.; LAWSON, D. **Silicone coated textile fabrics**. 1999. Disponível em: <https://www.freepatentsonline.com/6200915.html>. Acesso em: 24 fev. 2025.
- AMZA, C. G. *et al.* Accelerated aging effect on mechanical properties of common 3D-printing polymers. **Polymers**, v. 13, n. 23, p. 4132, 2021.
- ANDRADY, A. L.; PANDEY, K. K.; HEIKKILÄ, A. Interactive effects of solar UV radiation and climate change on material damage. **Photochemical and Photobiological Sciences**, v. 18, n. 3, p. 804–825, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C8PP90065E>. Acesso em: 05 jan. 2025.
- ARAÚJO, M. S. *et al.* **Pequeno Manual do Nylon**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 105-J01: têxteis — Ensaio de solidez da cor — Parte J01: princípios gerais para a medição da metameria**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 13937-2: têxteis — Propriedades de rasgamento de tecidos — Parte 2: Determinação da força de rasgamento de amostras em forma de calça de ensaio simples**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G173-03: standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface**. West Conshohocken: ASTM International, 2003. Reapproved 2012. Disponível em: <https://www.astm.org/G173-03.html>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- BAO, D. *et al.* Photo-thermal effects initiate multi-level energy conversion in “solid-solid” phase-changing fibers. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 281, p. 135819, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135819>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- BELLAMY, L. J. Esters and Lactones. In: BELLAMY, L. J. **The infrared spectra of complex molecules**. Boston, MA: Springer US, 1975. p. 203-228. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-94-011-6017-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-011-6017-9_11). Acesso em: 20 maio 2025.
- BETHMANN, René. **The Sustainable Future of Nylon**. Performance Days, Munich, 2021. Disponível em: <https://www.performancedays.com/loop/focus-topic/2021-12-the-sustainable-future-of-nylon.html>. Acesso em: 3 jun. 2025.
- CARROCCIO, S. *et al.* Matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight investigation of Nylon 6 and Nylon 66 thermo-oxidation products. **European Journal**

of **Mass Spectrometry**, v. 13, n. 6, p. 397-408, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1255/EJMS.899>. Acesso em: 11 jul. 2025.

CENTENO, J. A.; JOHNSON, F. B. Microscopic identification of silicone in human breast tissues by infrared microspectroscopy and X-ray microanalysis. **Applied Spectroscopy**, v. 47, n. 3, p. 341-345, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1366/0003702934066613>. Acesso em: 07 abr. 2025.

CHEN, K. *et al.* Water-Soluble, Self-Healing, and Debonding Primer for the Interface between Silicone Leather and Polydimethylsiloxane Composites. **Langmuir**, v. 40, n. 22, p. 11684–11694, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c01059>. Acesso em: 19 abr. 2025.

CHEN, W.-H. *et al.* UV-curable PDMS-containing PU system for hydrophobic textile surface treatment. **Journal of Polymer Research**, v. 16, n. 5, p. 601-610, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S10965-008-9265-4>. Acesso em: 22 abr. 2025.

CHIN, J. W. Durability of Composites Exposed to Ultraviolet Radiation. In: KARBHARI, V. M. **Durability of Composites in Construction**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2007. p. 80-97. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9781845693565.1.80>. Acesso em: 17 jun. 2025.

COLTHUP, N. B.; DALY, L. H.; WIBERLEY, S. E. Chapter 9 – carbonyl compounds. In: COLTHUP, N. B.; DALY, L. H.; WIBERLEY, S. E. **Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 1990. p. 289-325. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091740-5.50012-0>. Acesso em: 30 jun. 2025.

DARMON, S. E.; SUTHERLAND, G. B. B. M. Evidence from infra-red spectroscopy on the structure of proteins. **Nature**, v. 164, n. 4167, p. 440-441, 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/164440A0>. Acesso em: 18 abr. 2025.

DAVE, J. V.; HALPERN, P.; MYERS, H. J. Computation of incident solar energy. **IBM Journal of Research and Development**, v. 19, n. 6, p. 539-549, 1975. Disponível em: <https://doi.org/10.1147/RD.196.0539>. Acesso em: 14 jul. 2025.

DERUELLE, M.; YVES, G. **Silicone-based formulation comprising a silicone resin, metallic alkoxide and functional additive, useful as a coating for textile materials**. [S.l.: s.n.], 2004.

DILMAÇ, E.; TEZCAN KARDAŞ, N. Recreational Flow Experience and Perceived Wellness in Extreme Sports. In: GÖKTUĞ, T. H. (Ed.). **Architectural Sciences and Outdoor Recreation**. Ankara: Iksad Publications, 2024. p. 404-431. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13875145>. Acesso em: 09 fev. 2025.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

EAMES, D. A. Analysis of fiber UV degradation through an environmental chamber. 2023. *In: ANNUAL POSTER SYMPOSIUM FOR UNDERGRADUATE RESEARCH AND CREATIVITY*, 26 abr. 2023. **Undergraduate Research Posters** [...].

Richmond, Virginia: Forensic Science and Technology Commons, 26 abr. 2023. p. 1–2. Disponível em: <https://scholarscompass.vcu.edu/uresposters>. Acesso em: 07 jun. 2025.

EDGE, M. Infrared Spectroscopy in Analysis of Polymer Degradation. *In: MEYERS, R. A. (org.). Encyclopedia of Analytical Chemistry*. New York: Wiley, 2006.

Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470027318.A2013>. Acesso em: 30 jun. 2025.

EISENTHAL, K. B. Picosecond Relaxation Processes in Chemistry. *In: KRAMERS, H. A. et al. (Eds.). Optics and Lasers*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984. p. 275-315. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/3-540-13493-X\\_20](https://doi.org/10.1007/3-540-13493-X_20). Acesso em: 30 jun. 2025.

EL-BAYOUMI, M. A. Relaxation processes in excited molecular systems. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 80, n. 20, p. 2259-2264, 1976. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/J100561A025>. Acesso em: 14 jun. 2025.

ERDODI, G.; KRIENEN, A. The properties and applications of polyamide-based polyurethanes. *In: Polymer Science: A Comprehensive Reference*. Elsevier, 2021. p. 119-136. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821998-0.00007-7>. Acesso em: 14 jun. 2025.

FEIL, F.; MCGREER, M.; CORDO, O. Photochemical Aging and Weathering of Polymers—The Basics. *In: MENNA, T. J. (org.). Characterization and Failure Analysis of Plastics*. [S. l.]: ASM International, 2022. p. 399–410. DOI 10.31399/asm.hb.v11B.a0006920. Disponível em: <https://dl.asminternational.org/handbooks/book/171/chapter/3731498/Photochemical-Aging-and-Weathering-of-Polymers-The>. Acesso em: 23 mar. 2025.

FENG, X. **PPO (Poly-P-Phenylene Oxide) and PA66 (Polyamide 66) plastic**. [S. l.: s. n.], 9 jan. 2013. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/CN102863774A/en>. Acesso em: 27 out. 2025.

FERREIRA, Fabiana L. S. **Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Acesso em: 27 dez. 2024.

FOLHES, M. T.; FISCH, G. Caracterização climática e estudo de tendências nas séries temporais de temperatura do ar e precipitação em Taubaté (SP). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 1, n. 1, p. 61-71, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua>. Acesso em: 13 jan. 2025.

FRU®, Company. **WR-10 Colorimetry**. [São José dos Campos]: [s.n.]. Disponível em: <https://www.shahemeasuring.com/force-measuring-instruments>. Acesso em: 09 jun. 2025.

FUNG, D. **Composite fabric/silicone structure**. [S. l.: s. n.], 2004. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20050255772A1/en>. Acesso em: 15 mar. 2025.

PAREJO, P. G.; ZAYAT, M.; LEVY, D. Highly efficient UV-absorbing thin-film coatings for protection of organic materials against photodegradation. **Journal of Materials Chemistry**, [s. l.], v. 16, n. 22, p. 2165, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/B601577H>. Acesso em: 03 abr. 2025.

GARDETTE, J.-L. *et al.* Photodégradation des matériaux polymères. **Actualité Chimique**, v. 317, p. 25-30, 2007.

GEUSKENS, G. Chapter 3: Photodegradation of Polymers. *In*: BAMFORD, C. H.; TIPPER, C.F.H. (Eds.). **Degradation and Stabilization of Polymers**. Amsterdam: Elsevier, 1975. p. 333-424. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0069-8040\(08\)70335-2](https://doi.org/10.1016/S0069-8040(08)70335-2). Acesso em: 30 maio 2025.

GEUSKENS, G.; DAVID, C. The photo-oxidation of polymers. a comparison with low molecular weight compounds. **Pure and Applied Chemistry**, v. 51, n. 2, p. 233-240, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/PAC197951020233>. Acesso em: 18 jan. 2025.

GILBERT, A. S. IR and Raman Spectroscopies, Studies of Hydrogen Bonding and Other Physicochemical Interactions. *In*: LINDON, J. C.; GEORGE E. TRANTER; DAVID W. KOPPENAAL (ed.). **Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry**. 3. Ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 372-377. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803224-4.00339-3>. Acesso em: 24 jun. 2025.

GILLIBRAND, J. Polyurethane Coated Fabrics. **Journal of Industrial Textiles**, v. 3, n. 3, p. 153-163, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/152808377400300301>. Acesso em: 19 fev. 2025.

GIJSMAN, P.; DIEPENS, M. M. Photolysis and photooxidation in engineering plastics. *In*: CELINA, M. C.; WIGGINS, J. S.; BILLINGHAM, N. C. (Org.). **Polymer Degradation and Performance**. Washington, DC: American Chemical Society, 2009. p. 287-306. v. 1004. (ACS Symposium Series). Disponível em: <https://doi.org/10.1021/BK-2009-1004.CH024>. Acesso em: 27 maio 2025.

GO, C. W. *et al.* Waterborne polyurethane modified with silicone macromer and the nylon airbag coated with it. **Textile Research Journal**, v. 86, n. 19, p. 2015-2021, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0040517515619352>. Acesso em: 30 jun. 2025.

GRAIVER, D.; FARMINER, K. W.; NARAYAN, R. A Review of the Fate and Effects of Silicones in the Environment. **Journal of Polymers and The Environment**, v. 11, n. 4, p. 129-136, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1026056129717>. Acesso em: 11 jul. 2025.

GROENEVELD, I. *et al.* Parameters that affect the photodegradation of dyes and pigments in solution and on substrate – An overview. **Dyes and Pigments: An International Journal**, v. 210, n. 110999, p. 110999, 2023.

GUAN, M. *et al.* **Evaluation of color degradation on unearthed silks: A data analytical strategy based on microfading spectrometry**. 2023. SSRN, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4530952>. Acesso em: 9 jun. 2025.

GUILLET, J. E. Fundamental processes in the uv degradation and stabilization of polymers. *In*: RADO, R. **Degradation and Stabilization of Polymers**. London: Butterworth-Heinemann, 1972. p. 135-144. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-70310-9.50012-5>. Acesso em: 30 jul. 2025.

HÄBERLE, K. Dr. **Polyurethanes suitable as coating materials**. 1995. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US5707941A/en>. Acesso em: 12 abr. 2025.

HAWKINS, W. L. Stabilization Against Degradation by Radiation. *In*: HAWKINS, W. L. **Polymer Stabilization**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1984. p. 74-90. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-69376-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-69376-2_5). Acesso em: 20 abr. 2025.

HORSFALL, G. A. Factors Influencing the Daylight Photodegradation of Nylon 66, Nylon 6, and Polyester in Commercial Fabrics. **Textile Research Journal**, v. 52, n. 3, p. 197-205, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/004051758205200307>. Acesso em: 10 jul. 2025.

JANSEN, J. Plastic Failure Through Molecular Degradation: Multiple mechanisms can attack polymer chains-here's what can go wrong. **Plastics Engineering**, v. 71, n. 1, p. 34-39, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/J.1941-9635.2015.TB01285.X>. Acesso em: 08 jan. 2025.

JANTAS, M. **Paragliding porosity tester: how to test**. [S.l.]: [s.n.], [2025]. Disponível em: <https://porosimeter-mj.pl/how-to-test/>. Acesso em: 09 jun. 2025.

JELLINEK, H. Degradation processes in outdoor exposure. **Modern Plastics**, v. 44, n. 8, P 162, 1967. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/110101>. Acesso em: 03 mar. 2025.

JIN, Y. *et al.* A highly flexible and washable nonwoven photothermal cloth for efficient and practical solar steam generation. **Journal of Materials Chemistry**, v. 6, n. 17, p. 7942-7949, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C8TA00187A>. Acesso em: 18 jul. 2025.

KALWIK, A.; POSTAWA, P. Analysis of changes in the physical properties and structure of poly(oxymethylene) after ageing in natural conditions and accelerated by UVB-313 nm radiation. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 68, n. 4, p. 1519-1524, 2023. DOI 10.24425/amm.2023.146218. Disponível em: <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/146218/edition/129657/content>. Acesso em: 28 out. 2025.

KÄMPF, G. Wetterbeständigkeit von polymeren: Messung der photochemischen abbauprozesse und der schutzwirkung anorganischer pigmente mittels physikalischer untersuchungsmethoden†‡. **Angewandte Makromolekulare**

**Chemie**, v. 176, n. 1, p. 1-25, 1990. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1002/APMC.1990.051760101>. Acesso em: 10 jul. 2025.

KAYUMOV, R. A. *et al.* Development of film- and- fabric composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 158, n. 1, p. 012050, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/158/1/012050>. Acesso em: 30 mar. 2025.

KERRIGAN, V.; LAMBERT, A.; SHEARING, H. **Polyurethane surface coatings**. 1961. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/GB966338A/en>. Acesso em: 17 jul. 2025.

KLIMENT, T. Distribution spectra of measured solar radiation on the terrestrial surface. *In*: 2011 3RD IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LOGISTICS AND INDUSTRIAL INFORMATICS (LINDI 2011), ago. 2011. **3rd IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics** [...]. Budapest: IEEE, ago. 2011. p. 225–228. DOI 10.1109/LINDI.2011.6031152. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6031152/>. Acesso em: 27 out. 2025.

KUNWAR, R. R. Extreme Sport: Understanding the Concept, Recognizing the Value. **Journal of Tourism & Adventure**, v. 4, n. 1, p. 89-123, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3126/jota.v4i1.39156>. Acesso em: 14 jan. 2025.

KAMWERU, P. K. *et al.* UV Absorption and dynamic mechanical analysis of polyethylene films. **International Journal of Physical Sciences**, v. 9, n. 24, p. 545–555, 30 dez. 2014. DOI 10.5897/IJPS2014.4229. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/IJPS/article-abstract/B72482449175>. Acesso em: 22 abr. 2025.

LA MANTIA, F. P.; DINTCHEVA, N. T. Time-carbonyl groups equivalence in photo-oxidative aging of virgin/recycled polymer blends. **Plastics Rubber and Composites**, v. 33, n. 4, p. 184-186, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/174328913X13789828036304>. Acesso em: 30 jul. 2025.

LEMAIRE, J.; ARNAUD, R.; GARDETTE, J.-L. The role of hydroperoxides in photooxidation of polyolefins, polyamides and polyurethane elastomers. **Pure and Applied Chemistry**, v. 55, n. 10, p. 1603-1614, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/PAC198355101603>. Acesso em: 10 abr. 2025.

LIU, Y. A Study on Decomposition of Nanoparticle Finished Textiles. **International Journal of Nanoscience and Nanoengineering**, v. 4, n. 5, p. 80-82, 2018.

LOCK, L. M.; FRANK, G. C. A Study of Some Factors Affecting the Photodegradation of Textile Yarns Part II: Nylon 66 and Polyethylene Terephthalate Yarns. **Textile Research Journal**, v. 43, n. 9, p. 502-512, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/004051757304300902>. Acesso em: 29 abr. 2025.

MACKNIGHT, W. J.; YANG, M. Property-structure relationships in poly-urethanes: Infrared studies. **Journal of Polymer Science: Polymer Symposia**, v. 42, n. 2, p.

817-832, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/POLC.5070420231>. Acesso em: 11 jul. 2025.

MAREK, B.; LERCH, E. Photodegradation and yellowing of polyamides. **Journal of the Society of Dyers and Colourists**, v. 81, n. 11, p. 481-486, nov. 1965.

MATSUBARA, I.; MAGILL, J. H. Lower-frequency infrared spectra and structures of some typical aliphatic polyamides†. **Journal of Polymer Science Part B**, v. 11, n. 6, p. 1173-1187, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/POL.1973.180110610>. Acesso em: 30 jul. 2025.

MATSUURA, H. *et al.* Experimental evidence for intramolecular blue-shifting C-H...O hydrogen bonding by matrix-isolation infrared spectroscopy. **Journal of the American Chemical Society**, v. 125, n. 46, p. 13910-13911, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/JA030538F>. Acesso em: 30 jul. 2025.

MCKEEN, L. W. Polyamides (Nylons). In: MCKEEN, L. W. (ed.). **The Effect of Ultraviolet Radiation on Plastics**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 129-155. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813292-0.00008-3>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MEHR, M. Y. *et al.* Study on the Degradation of Optical Silicone Exposed to Harsh Environments. **Materials**, v. 11, n. 8, p. 1305, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/MA11081305>. Acesso em: 26 mar. 2025.

MENGÜÇ, G. S.; TEMEL, E.; BOZDOĞAN, F. Sunlight exposure: the effects on the performance of paragliding fabric. **Industria Textila**, v. 69, n. 5, p. 381-389, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.35530/IT.069.05.1406>. Acesso em: 9 jun. 2025.

MEYER, D. L. *et al.* Direct S<sub>0</sub>→T Excitation of a Conjugated Polymer Repeat Unit : Unusual Spin-Forbidden Transitions Probed by Time-Resolved Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy. **Journal of Physical Chemistry Letters**, v. 8, n. 7, p. 1677-1682, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCLETT.7B00644>. Acesso em: 30 jul. 2025.

MOGHIM, T. B. **Accelerated degradation of a polyurethane aerospace coating**. 2020. Tese (Doutorado) – University of Surrey, School of Mechanical Engineering Sciences, Guildford, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15126/THESIS.00845731>. Acesso em: 30 jul. 2025.

MUKHERJEE, S.; VARGANOV, S. A. Intersystem crossing and internal conversion dynamics with GAIMS-TeraChem: Excited state relaxation in 2-cyclopentenone. **Journal of Chemical Physics**, v. 155, n. 17, p. 174107, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0068040>. Acesso em: 19 jan. 2025.

MURTY, E. M.; YEHL, T. W. Adaptation of photoacoustic fourier transform infrared spectroscopy for studying the thermal oxidation of nylon 66 at 150°C correlated to mechanical properties. **Polymer Engineering and Science**, v. 30, n. 24, p. 1595-1598, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/PEN.760302407>. Acesso em: 17 jan. 2025.

NAKAYAMA, K.; INO, T.; MATSUBARA, I. Infrared Spectra and Structure of Polyurethane Elastomers from Polytetrahydrofuran, Diphenylmethane-4, 4'-diisocyanate, and Ethylenediamine. **Journal of Macromolecular Science, Part A**, v. 3, n. 5, p. 1005-1020, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10601326908051929>. Acesso em: 09 jun. 2025.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 13 jul. 2025.

PICKETT, J. E.; MOORE, J. E. Photodegradation of UV absorbers: Kinetics and structural effects. **Angewandte Makromolekulare Chemie**, v. 232, n. 1, p. 229-238, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/APMC.1995.052320114>. Acesso em: 30 jul. 2025.

PMA RESEARCH PAPER. **Draft PMA: Standard specifying uniform instructions and criteria to assess the airworthiness of a used paraglider**. Version V 2024.12.1. [S.l.]: [s.n.], 2024. (Reference repository of public PMA documents). Disponível em: <https://p-m-a.info/pma-documents/>. Acesso em: 9 jun. 2025.

QIN, J. *et al.* **Alteration of Polymer Functional Groups Upon Formation of Secondary Microplastics from Weathering of Common Commercial Plastics in Water Under Solar Irradiation**. 2023. (Preprint). Disponível em: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4587038>. Acesso em: 18 mar. 2025.

RABEK, J. F. **Photochemical aspects of degradation of polymers**. Dordrecht: Springer, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1274-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1274-1_2). Acesso em: 10 jul. 2025.

RABEK, J. F. **Polymer Photodegradation: Mechanisms and experimental methods**. [S.l.]: Chapman & Hall, 2012. Disponível em: <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA2397159X>. Acesso em: 30 jul. 2025.

RODRIGUEZ, J. H. Ground- and excited-state electronic structure of an iron-containing molecular spin photoswitch. **Journal of Chemical Physics**, v. 123, n. 9, p. 094709, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.2018632>. Acesso em: 18 jan. 2025.

ROSU, D.; VARGANICI, C.-D.; ROSU, L. Multicomponent Polymer Materials: Photodegradation Mechanism. *In*: ROSU, D.; VISAKH P. M. (org.). **Photochemical Behavior of Multicomponent Polymeric-based Materials. Advanced Structured Materials**. Cham: Springer International Publishing, 2016. v. 26, p. 67–89. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25196-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25196-7_3). Acesso em: 09 jun. 2025.

ROSSBACH, V. Formation of carbonyl groups during production, spinning, and finishing of polyamide 6 and 6.6†‡. **Angewandte Makromolekulare Chemie**, v. 57, n. 1, p. 175-182, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/APMC.1977.050570114>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SCHAFFER, M. A. *et al.* Thermal Nonoxidative Degradation of Nylon 6,6. **Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 40, n. 4, p. 233-272, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1081/MC-100102398>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SCHULTZE, H. Über den photochemischen abbau von polyurethanen. **Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 172, n. 1, p. 57-75, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/MACP.1973.021720105>. Acesso em: 21 mar. 2025.

ŠEBEK, J. *et al.* Spectroscopy of the C-H stretching vibrational band in selected organic molecules. **Journal of Physical Chemistry A**, v. 117, n. 32, p. 7442-7452, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/JP4014674>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SEVILLANO-BENDEZÚ, M. A. *et al.* Average photon energy assessment based on modelled spectra from the National Solar Radiation Database for Lima, Peru. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2180, n. 1, p. 012018, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2180/1/012018>. Acesso em: 14 jul. 2025.

SHAHE®, Company. **AMF and KF Digital Push Pull Gauge**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.colorinstrument.cn/down?list=173&sid=174>. Acesso em: 9 jun. 2025.

SHIMAMURA, H.; NAKAMURA, T. **Mechanical Properties Degradation and its Prediction Methods of Polyimide Films Exposed to Space Environment**. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <https://ci.nii.ac.jp/naid/110008456609>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SMOLEŃ, J. *et al.* Assessment of the effectiveness of selected coatings for protection against UV radiation in glass fiber reinforced composites (GFRP). **Coatings Technology and Protection**, v. 24, n. 1, p. 65–71, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.62753/ctp.2024.09.1.1>. Acesso em: 31 jul. 2025.

STOWE, B. S. *et al.* The Effect of Near-Ultraviolet Radiation on the Morphology of Nylon 66. **Textile Research Journal**, v. 43, n. 12, p. 704-714, 1973. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/004051757304301203>. Acesso em: 14 jan. 2025.

TANG, W. *et al.* First Effort for Constructing a Direct Solar Radiation Data Set in China for Solar Energy Applications. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 3, p. 1724-1734, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2017JD028005>. Acesso em: 18 mar. 2025.

TEC-01: lighter, thinner and stronger. **Cross Country Magazine**, East Sussex, n. 130, jul./ago. 2010, p. 3. Disponível em: [https://www.apcoaviation.com/wp-content/uploads/2018/04/tec-01\\_lighter-thinner-stronger\\_xc\\_Jul-Aug\\_2010\\_no130.pdf](https://www.apcoaviation.com/wp-content/uploads/2018/04/tec-01_lighter-thinner-stronger_xc_Jul-Aug_2010_no130.pdf). Acesso em: 10 jun. 2025.

VAISALA®. **CMP6 Solar Radiation Sensor**. Finlândia: [s.n.], 2010. Disponível em: [https://www.hobeco.net/sites/default/files/folheto\\_cmp6\\_vaisala.pdf](https://www.hobeco.net/sites/default/files/folheto_cmp6_vaisala.pdf). Acesso em: 9 jun. 2025.

VENKATACHALAM, S. *et al.* Degradation and Recyclability of Poly (Ethylene Terephthalate). In: SALEH, H. E.-D. (org.). **Polyester**. [S. l.]: InTechopen, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/48612>. Acesso em: 27 abr. 2025.

VIEIRA, L. de O. *et al.* Características dos eventos extremos de temperatura e precipitação na região do Vale do Paraíba Paulista e Litoral Norte de São Paulo. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 33, p. 378-408, jul./dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/abclima.16569>. Acesso em: 16 mar. 2025.

VIERS, B. D. Nylon 6,6. In: MARK, James E. (ed.). **Encyclopedia of Polymer Science and Technology**. Oxford: Oxford University Press, 2009. p. 263-284. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195181012.003.0043>. Acesso em: 30 maio 2025.

WANG, Zheng; QIAN, Libing; PENG, Xiangyang; HUANG, Zhen; YANG, Yue; HE, Chunqing; FANG, Pengfei. **New Aspects of Degradation in Silicone Rubber under UVA and UVB Irradiation: A Gas Chromatography–Mass Spectrometry Study**. *Polymers*, v. 13, n. 13, p. 2215, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13132215>. Acesso em: 30 jul. 2025.

WINSLOW, F. H. Photooxidation of high polymers. **Pure and Applied Chemistry**, v. 49, n. 4, p. 495-502, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/PAC197749040495>. Acesso em: 12 jun. 2025.

XIAO, H. *et al.* Optical Degradation of Polydimethylsiloxane Under 150 keV Proton Exposure. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 109, n. 6, p. 4060-4064, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/APP.28591>. Acesso em: 30 jul. 2025.

XU, Yong Xiang *et al.* Uv photo-degradation of coatings. **Corrosion and Protection**, v. 24, n. 3, p. 168-173, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-4537.2004.03.010>. Acesso em: 22 fev. 2025.

YOUSIF, E.; HADDAD, R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. **SpringerPlus**, v. 2, n. 1, p. 398, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>. Acesso em: 04 maio 2025.

ZAKARIA, S. F.; ROSNAN, S. M. Photodegradation of Materials: An Overview. In: HASSAN, O. H. *et al.* (org.). **Proceedings of the International Symposium on Research of Arts, Design and Humanities (ISRADH 2014)**. Singapore: Springer Singapore, 2015. p. 171–178. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-981-287-530-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-287-530-3_17). Acesso em: 17 abr. 2025.

ZHANG, T. *et al.* Perspective in Textile Energy Storage Integrated Textile Elements: Textile Materials, Structure, and Manufactured Methods. **Advanced Energy Advanced Energy Materials**, v. 14, n.9, p. 2303587, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aenm.202303587>. Acesso em: 09 jun. 2025.

ZOHDI, V. *et al.* Importance of tissue preparation methods in FTIR micro-spectroscopical analysis of biological tissues: “traps for new users.” **PLOS ONE**, v.

10, n. 2, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0116491>.  
Acesso em: 18 mar. 2025.