



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

Pollyane Cibely da Cunha

**Tingimento de algodão com corantes natural e sintético:**  
Estudo comparativo do desempenho técnico e ambiental em escala produtiva

Blumenau

2026

Pollyane Cibely da Cunha

**Tingimento de algodão com corantes natural e sintético:**

Estudo comparativo do desempenho técnico e ambiental em escala produtiva

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil do Centro Tecnológico de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de mestre em Engenharia Têxtil.

Orientador(a):

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cátia Rosana Lange de Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Rafael Silva de Oliveira

Blumenau

2026

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Cunha, Pollyane Cibely da

Tingimento de algodão com corantes natural e sintético  
: Estudo comparativo do desempenho técnico e ambiental em  
escala produtiva / Pollyane Cibely da Cunha ; orientador,  
Cátia Rosana Lange de Aguiar, coorientador, Carlos Rafael  
Silva de Oliveira, 2026.

114 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Têxtil, Blumenau, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Tingimento de fibras  
celulósica com Corante natural e corantes reativos . 3.  
Beneficiamento têxtil. 4. Caracterização de processos  
têxteis com corantes naturais. 5. Ecotoxicidade têxtil. I.  
Aguiar, Cátia Rosana Lange de . II. Oliveira, Carlos  
Rafael Silva de . III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil.  
IV. Título.

Pollyane Cibely da Cunha

**Tingimento de algodão com corantes natural e sintético:**

Estudo comparativo do desempenho técnico e ambiental em escala produtiva

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 28 de janeiro de 2026, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.<sup>a</sup>. Catia Rosana Lange de Aguiar, Dr<sup>a</sup>.

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Jorge Marcos Rosa, Dr.

Universidade Federal do ABC

Prof. Odinei Hess Gonçalves, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Têxtil.

---

Prof Dr. Miguel Angelo Granato.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Catia Rosana Lange de Aguiar

Orientadora

Blumenau, 2026

Dedicado à minha família em Minas Gerais.  
Dedico ao Juliano, meu esposo e Maria Clara, minha filha.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por tudo.

Aos meus pais João Francisco da Cunha, em memória, e Geralda Ezária da Cunha e minha família de Minas Gerais.

Ao Juliano da Silva e a Maria Clara da Cunha Silva, meus amores, minha família.

Aos meus sogros Elizete Rodrigues e Jair Rodrigues da Silva por tamanha acolhida.

À Universidade Federal de Santa Catarina.

Aos meus orientadores Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cátia Rosana Lange de Aguiar e Prof. Dr. Carlos Rafael Silva de Oliveira.

À empresa Círculo Ltda e aos colegas de trabalho.

A todos os colegas de mestrado.

Agradeço por ser uma estrela na terra.

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

(Filipenses 4:13)

## RESUMO

A crescente preocupação com os impactos ambientais dos processos de tingimento têxtil tem impulsionado o uso de corantes naturais. Este trabalho compara o desempenho tintorial e ambiental do corante natural de tom violeta, obtido de bastões de *Kerria lacca*, com o de uma tricromia de corantes reativos sintéticos aplicada em fios de algodão, em escala laboratorial e produtiva. Foram avaliados rendimento tintorial, parâmetros colorimétricos ( $\Delta E^*$  e K/S), cinética e isothermas de tingimento, solidez e características dos efluentes gerados. O corante natural apresentou intensidade colorística intermediária (K/S  $\approx$  1,73), porém com dificuldade de reprodutibilidade de cor, refletida em valores de  $\Delta E^*$  frequentemente superiores ao limite industrial de 1,5. A tricromia reativa demonstrou maior controle tonal e menor variação entre lotes. A cinética do tingimento reativo ajustou-se melhor ao modelo de pseudo-primeira ordem ( $R^2 = 0,863$ ), indicando predominância de mecanismos difusivos nas condições avaliadas, enquanto o sistema natural apresentou ajuste apenas moderado ao mesmo modelo ( $R^2 = 0,8486$ ) e muito baixo ao modelo de pseudo-segunda ordem ( $R^2 = 0,2245$ ), evidenciando comportamento instável, adsorção superficial e ocorrência de dessorção ao longo do processo. As análises de solidez indicaram notas em torno de 4 na escala de cinza para ambos os sistemas, embora o tingimento natural tenha apresentado maior perda perceptível de intensidade após lavagem e fricção. Na etapa em escala piloto, os efluentes do tingimento reativo apresentaram elevada salinidade, com concentração de cloretos da ordem de  $10^3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , enquanto o processo com corante natural resultou em menores teores de sais, porém em maior toxicidade aguda aquática, avaliada por ensaios com *Daphnia magna* (48 h), com  $CE_{50} = 2,21 \%$  (v/v) e FT = 64, frente a  $CE_{50} = 35,36 \%$  (v/v) e FT = 4 para o sistema reativo. Conclui-se que, nas condições estudadas, o corante natural tom violeta ainda não reúne desempenho técnico e ambiental suficiente para substituir diretamente a tricromia reativa, embora se mostre promissor mediante otimização de processo e tratamento específico de efluentes.

**Palavras-chave:** Corante natural; Corantes reativos; Tingimento de algodão; cinética de tingimento; Caracterização de efluentes; Ecotoxicidade têxtil.

## ABSTRACT

The growing concern regarding the environmental impacts of textile dyeing processes has encouraged the investigation of natural dyes as alternative colorants. This study compares the technical and environmental performance of a violet natural dye extracted from *Kerria lacca* sticks with that of a synthetic reactive dye trichromy applied to 100% cotton yarn, at both laboratory and pilot scales. The evaluation included dyeing yield, colorimetric parameters ( $\Delta E^*$  and K/S), kinetic and isotherm behavior, color fastness properties, and effluent characterization. The natural dye exhibited intermediate color strength (K/S  $\approx$  1,7), but showed limited color reproducibility, reflected in  $\Delta E^*$  values frequently exceeding the industrial acceptance threshold of 1.5. In contrast, the reactive trichromy demonstrated better tonal control and lower batch-to-batch variation. Kinetic analysis indicated that the reactive dyeing process showed a better fit to the pseudo-first-order model ( $R^2 = 0,863$ ), suggesting predominance of diffusion-controlled mechanisms under the evaluated conditions. The natural dye system presented only moderate fitting to the same model ( $R^2 = 0.8486$ ) and a very poor fit to the pseudo-second-order model ( $R^2 = 0.2245$ ), indicating unstable adsorption behavior, weak surface interactions, and desorption over time. Color fastness results showed gray scale ratings around 4 for both systems; however, the natural dye exhibited more noticeable color loss after washing and rubbing. At pilot scale, effluent analysis revealed that the reactive dyeing process generated high salinity levels, with chloride concentrations on the order of  $10^3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . In contrast, the natural dye process produced lower salt content but higher acute aquatic toxicity, as determined by 48-hour *Daphnia magna* bioassays, with  $\text{CE}_{50} = 2.21\%$  (v/v) and Toxicity Factor (TF) = 64, compared to  $\text{CE}_{50} = 35.36\%$  (v/v) and TF = 4 for the reactive system. It can be concluded that, under the conditions investigated, the violet natural dye does not yet demonstrate sufficient technical and environmental performance to directly replace reactive dye trichromy in cotton dyeing. Nevertheless, it shows potential as a complementary alternative, provided that process optimization and specific effluent treatment strategies are implemented.

**Keywords:** Natural dye; Reactive dyes; Cotton dyeing; Dyeing kinetics; Effluent characterization; Textile ecotoxicity

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capulho da fibra de Algodão: [à esquerda]; e sua unidade repetitiva da celulose .....	23
Figura 2 - Esquema de produção do algodão em fiação na empresa Círculo .....	24
Figura 3 - Escala de reatividade de corantes .....	28
Figura 4 - Estrutura corante Vermelho 195 .....	29
Figura 5 - Estrutura corante azul reativo - 222 .....	30
Figura 6 - Estrutura corante reativo Amarelo 145.....	30
Figura 7 - (a) Resina natural secretada pelo inseto <i>Kerria lacca</i> sobre o hospedeiro vegetal; (b) estruturas químicas representativas dos principais ácidos lacaicos (A–G), incluindo o ácido flavokermésico (ácido lacaico D), constituintes do corante lac; (c) estruturas químicas de derivados associados à goma-laca, com destaque para eritrolaccina e desoxieritrolaccina. ....	35
Figura 8 - Etapas do tingimento .....	36
Figura 9 - Sistema tridimensional das cores CIELAB .....	38
Figura 10 - Isoterma de Nernst.....	42
Figura 11 - Isoterma de Langmuir .....	43
Figura 12 - Isoterma de Freundlich .....	43
Figura 13 - Crescimento das publicações sobre corantes naturais aplicados a substratos têxteis .....	51
Figura 14 – Esquema das etapas do estudo .....	59
Figura 15 - Pré-alveamento .....	61
Figura 16 - Gráfico do tingimento natural .....	64
Figura 17 - Gráfico de tingimento reativo .....	66
Figura 18 - Amostra Padrão Viola 3% .....	76
Figura 19 - Padrão de referência da tonalidade violeta (Pantone® 15-3508) .....	76
Figura 20 – Tricromia reativa.....	77
Figura 21 – Amostra tinta em produção – natural (a e b) x reativo (c e d) .....	79
Figura 22 - Concentração do corante reativo ao longo do tingimento .....	81
Figura 23 - Ajustes experimentais aos modelos cinéticos de adsorção do corante reativo: (a) PFO; (b) PSO.....	82
Figura 24 - Concentração do corante natural ao longo do tingimento.....	83

Figura 25 - Ajustes experimentais aos modelos cinéticos de adsorção do corante natural: (a) PFO; (b) PSO.....	85
Figura 26 - Isotermas de adsorção do corante natural tom violeta: (a) isoterma experimental com ajuste ao modelo de Nernst; (b) ajuste ao modelo de Langmuir; (c) ajuste ao modelo de Freundlich. ....	88
Figura 27 - Micrografias de MEV das amostras de algodão em diferentes estágios de processamento, aumento de 500×: (a) fibras de algodão in natura, (b) fio de algodão cru, (c) fio de algodão pré-alvejado, (d) fio de algodão cationizado, (e) fio de algodão tingido com corante reativo e (f) fio de algodão tingido com corante natural. ....	93
Figura 28 - Espectros de FTIR (infravermelho com transformada de Fourier) das diferentes amostras estudadas: .....	97
Figura 29 - Espectros de Comparação do Tingimento: .....	99
Figura 30 - Parâmetros orgânicos e inorgânicos dos efluentes.....	102
Figura 31 – Parâmetros de toxicidade, turbidez e pH dos efluentes .....	104
Figura 32 - Curva de calibração da tricromia reativa.....	114
Figura 33 - Curva de calibração corante natural .....	114

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Composição química média das fibras de algodão .....	25
Quadro 2– Cronologia de uso de corantes naturais .....	32
Quadro 3 - Comparativo de Efluentes de tingimento.....	50
Quadro 4 - Pesquisas relevantes referente aos corantes naturais.....	54
Quadro 5 - Materiais do estudo .....	57
Quadro 6 - Equipamentos e <i>Software</i> .....	58
Quadro 7 - Receita de pré-alveamento .....	60
Quadro 8 – Formulação do tingimento com corante natural .....	62
Quadro 9 – Formulação de tingimento com corante reativo.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulação para o tingimento com o corante natural em escala industrial .....	65
Tabela 2 - Formulação do tingimento com corante reativo .....	66
Tabela 3 - Resultados Tingimento corante natural.....	75
Tabela 4 - Dados colorimétricos da tricromia com corantes reativos (base: tonalidade violeta 3%).....	77
Tabela 5 – Avaliação de cor via espectrofotometria .....	78
Tabela 6 – Avaliação de resistência de cor .....	90
Tabela 7 - Propriedades de resistência e alongamento do fio 4/2 retorcido nas diferentes etapas de processamento .....	91
Tabela 8 - Principais bandas de absorção no infravermelho ( $\text{cm}^{-1}$ ) para as amostras de algodão nos diferentes estágios do processo. ....	96
Tabela 9 - Comparação da Absorbância na região C-O $1023 \text{ cm}^{-1}$ .....	100
Tabela 10 - Parâmetros físico-químicos dos efluentes gerados.....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CE50 – Concentração efetiva média (ensaios de toxicidade)
- CIE – Commission Internationale de l'Éclairage (Comissão Internacional de Iluminação)
- CIELAB – Espaço de cor CIE  $L^*a^*b^*$
- DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
- DQO – Demanda Química de Oxigênio
- FT – Fator Tóxico
- GOTS – Global Organic Textile Standard
- ISO – International Organization for Standardization
- LABENE – Laboratório de Beneficiamento Têxtil da UFSC
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- NBR – Norma Brasileira
- ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
- ONU – Organização das Nações Unidas
- RKM – Tenacidade específica (gf/tex)
- TDS – Total Dissolved Solids (Sólidos Totais Dissolvidos)
- UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
- UV-Vis – Espectrofotômetro de absorvância no ultravioleta–visível (UV-Vis)
- ZDHC – Zero Discharge of Hazardous Chemicals

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a^*$  – coordenada de cor no eixo vermelho–verde no sistema CIELAB
- $A$  – área de transferência de massa na difusão ( $m^2$ )
- $b^*$  – coordenada de cor no eixo amarelo–azul no sistema CIELAB
- $C_0$  – concentração inicial de corante em solução ( $mg \cdot L^{-1}$ )
- $C_b$  – concentração de corante no banho no equilíbrio ( $g \cdot L^{-1}$ )
- $C_e$  – concentração de corante em solução no equilíbrio ( $mg \cdot L^{-1}$ )
- $C_f$  – concentração de corante na fibra no equilíbrio ( $g \cdot g^{-1}$ )
- $C_t$  – concentração de corante em solução no tempo  $t$  ( $mg \cdot L^{-1}$ )
- $CE_{50}$  – concentração efetiva média responsável por 50% do efeito tóxico (% , v/v)
- $D$  – coeficiente de difusão ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
- $DBO$  – demanda bioquímica de oxigênio ( $mg \cdot L^{-1}$ )
- $DQO$  – demanda química de oxigênio ( $mg \cdot L^{-1}$ )
- $ds/dt$  – taxa de difusão de massa ( $g \cdot s^{-1}$ )
- $dc/dx$  – gradiente de concentração ( $g \cdot m^{-4}$ )
- $FT$  – fator tóxico (–)
- $K$  – constante de afinidade entre o corante e a fibra ( $L \cdot g^{-1}$ )
- $K_f$  – constante da isoterma de Freundlich [ $(g \cdot g^{-1})(L \cdot g^{-1})^{(1/n)}$ ]
- $K/S$  – intensidade colorística (coeficiente de absorção/espalhamento)
- $k_1$  – constante cinética de pseudo-primeira ordem ( $min^{-1}$ )
- $k_2$  – constante cinética de pseudo-segunda ordem ( $g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$ )
- $L^*$  – coordenada de luminosidade no sistema CIELAB
- $Ne$  – número inglês (título do fio no sistema inglês)
- $n$  – índice de heterogeneidade da isoterma de Freundlich (–)
- $q$  – quantidade de corante adsorvida por unidade de massa de fibra ( $mg \cdot g^{-1}$ )
- $q_e$  – capacidade de adsorção no equilíbrio ( $mg \cdot g^{-1}$ )
- $q_t$  – capacidade de adsorção em função do tempo ( $mg \cdot g^{-1}$ )
- $R^2$  – coeficiente de determinação das regressões lineares
- $S_f$  – capacidade máxima de fixação da fibra ( $g \cdot g^{-1}$ )
- $t$  – tempo (min)
- $TDS$  – sólidos totais dissolvidos ( $mg \cdot L^{-1}$ )
- $\Delta E^*$  – distância Euclidiana no espaço colorimétrico CIELAB

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	20
1.1.1	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	FIBRA DE ALGODÃO .....	22
<b>2.1.1</b>	<b>Composição das fibras de algodão.....</b>	<b>25</b>
2.2	CORANTES .....	25
<b>2.2.1</b>	<b>Corantes reativos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Corantes naturais.....</b>	<b>31</b>
2.2.2.1	<i>Corante Viola – corante natural.....</i>	<i>34</i>
2.3	PROCESSO DE TINGIMENTO DE ALGODÃO POR ESGOTAMENTO ....	35
2.4	PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE TINGIMENTO .....	37
<b>2.4.1</b>	<b>Colorimetria.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Cinética de tingimento.....</b>	<b>38</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Fase termodinâmica - Isotermas de tingimento.....</b>	<b>41</b>
2.5	EFLUENTES GERADOS NO PROCESSO DE TINGIMENTO .....	45
<b>2.5.1</b>	<b>Impactos no Tratamento de Efluentes Têxteis.....</b>	<b>46</b>
2.6	ESTUDOS SOBRE TINGIMENTO COM CORANTES NATURAIS.....	51
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>56</b>
3.1	MATERIAIS.....	56
3.2	EQUIPAMENTOS .....	58
3.3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	58
<b>3.3.1</b>	<b>Desenvolvimento de cores.....</b>	<b>59</b>
3.3.1.1	<i>Pré-Alvejamento dos fios .....</i>	<i>60</i>
3.3.1.2	<i>Formulação de tingimento e processo com corante natural.....</i>	<i>61</i>
3.3.1.3	<i>Formulação de tingimento e processo com corante reativo .....</i>	<i>62</i>
3.4	REPRODUÇÃO EM ESCALA PRODUTIVA .....	63
<b>3.4.1</b>	<b>Tingimento com o corante natural em escala produtiva.....</b>	<b>64</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Tingimento com corante reativo em escala produtiva .....</b>	<b>65</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Procedimentos para estudo cinético e de equilíbrio .....</b>	<b>67</b>
3.4.3.1	<i>Elaboração da Curva de calibração dos corantes.....</i>	<i>67</i>
3.4.3.2	<i>Procedimento experimental para estudo da cinética de tingimento .</i>	<i>67</i>

3.4.3.3	<i>Procedimento de ajuste e modelagem cinética</i> .....	68
3.4.3.4	<i>Determinação das Isotermas de tingimento</i> .....	69
<b>3.4.4</b>	<b>Caracterização dos fios tintos</b> .....	<b>69</b>
3.4.4.1	<i>Determinação colorimétrica</i> .....	70
3.4.4.2	<i>Avaliação da solidez</i> .....	71
3.4.4.3	<i>Determinação da Resistência mecânica dos fios</i> .....	71
3.4.4.4	<i>Microscopia eletrônica de varredura</i> .....	72
3.4.4.5	<i>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier</i> .....	73
<b>3.4.5</b>	<b>Caracterização dos efluentes gerados</b> .....	<b>74</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>75</b>
4.1	AVALIAÇÃO COLORIMÉTRICA DOS FIOS .....	75
4.1.1	<b>Reprodutibilidade do corante natural em laboratório</b> .....	<b>75</b>
4.1.2	<b>Corante reativo (tricromia)</b> .....	<b>77</b>
4.1.3	<b>Avaliação de cor em escala produtiva</b> .....	<b>78</b>
4.2	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO E CINÉTICA DE TINGIMENTO DOS CORANTES .....	79
4.2.1	<b>Curva de calibração dos corantes</b> .....	<b>80</b>
4.2.2	<b>Cinética de tingimento</b> .....	<b>80</b>
4.2.2.1	<i>Cinética de tingimento com corantes reativos (Tricromia)</i> .....	81
4.2.2.2	<i>Cinética de tingimento com o corante natural</i> .....	83
4.2.3	<b>Comparação entre cinéticas de tingimento: reativo versus natural</b> .....	<b>86</b>
4.2.4	<b>Resultados Avaliação das isotermas de tingimento</b> .....	<b>87</b>
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS FIOS TINGIDOS .....	89
4.3.1	<b>Avaliação da solidez das amostras tingidas</b> .....	<b>89</b>
4.3.2	<b>Resistência a tração mecânica dos fios</b> .....	<b>90</b>
4.3.3	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....	<b>92</b>
4.3.4	<b>Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier</b> .....	<b>95</b>
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES .....	101
4.4.1	<b>Caracterização físico-química e colorimétrica dos efluentes</b> .....	<b>102</b>
4.4.2	<b>Avaliação ecotoxicológica dos efluentes</b> .....	<b>103</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>108</b>
	<b>Apêndice A – Curva de calibração dos corantes</b> .....	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O tingimento é uma prática milenar, com registros históricos que remontam a 2500 a.C., evidenciando sua importância cultural e simbólica na diferenciação individual entre povos e classes sociais (PARK & SHORE, 2007; GULRAJANI, 2011). Em antigas civilizações como a egípcia, chinesa e indiana, o uso de corantes naturais era frequente, sendo encontrados tecidos tingidos com pigmentos vegetais e animais em túmulos e manuscritos históricos (GULRAJANI, 2011). A aplicação de cor em substratos têxteis transcendeu a função de proteção corporal, assumindo papel estético, espiritual e político (BECHTOLD & MUSSAK, 2009).

Durante séculos, os processos tintoriais foram essencialmente empíricos, baseados no conhecimento artesanal e na experimentação com matérias-primas naturais. Esse cenário começou a se modificar a partir do século XIX, com o advento da Revolução Industrial e o avanço da química orgânica, que possibilitaram o desenvolvimento e a produção em larga escala de corantes sintéticos, os quais gradualmente substituíram os corantes naturais na indústria têxtil, principalmente em função de sua maior reprodutibilidade, estabilidade e variedade cromática (BROADBENT, 2001).

Entre os corantes sintéticos, os corantes reativos consolidaram-se como a principal classe empregada no tingimento de fibras celulósicas, em razão de sua elevada afinidade com a celulose, ampla gama de tonalidades disponíveis e boa solidez da cor. Grande parte desses corantes pertence à classe dos corantes azo, que representam a maior parcela da produção global de corantes sintéticos, especialmente no segmento têxtil, devido à sua versatilidade estrutural e eficiência tintorial (SHORE, 2002; BURKINSHAW, 2016).

Apesar das vantagens técnicas associadas aos corantes reativos, seu uso em escala industrial está frequentemente relacionado à geração de efluentes complexos, caracterizados por elevada carga orgânica, salinidade significativa e coloração residual persistente. Essas características impõem desafios relevantes aos sistemas convencionais de tratamento de efluentes, exigindo soluções tecnológicas adequadas para a mitigação dos impactos ambientais associados aos processos de tingimento têxtil (YAGUB et al., 2012; ROSA et al., 2020).

Paralelamente, o interesse por corantes naturais tem sido retomado nas últimas décadas, impulsionado por demandas ambientais, por pressões regulatórias

e pela busca por alternativas mais alinhadas a princípios de sustentabilidade. Entretanto, a literatura ressalta que a adoção de corantes naturais não deve ser associada de forma simplificada a um menor impacto ambiental, uma vez que fatores como a origem da matéria-prima, os métodos de extração, os agentes auxiliares empregados e as condições operacionais do tingimento influenciam diretamente o desempenho técnico e a composição dos efluentes gerados (BECHTOLD et al., 2006; PICCOLI, 2008).

Nesse contexto, um dos principais desafios contemporâneos da indústria têxtil consiste em viabilizar, em escala produtiva, processos de tingimento que conciliem desempenho técnico, reprodutibilidade de cor e redução dos impactos ambientais associados, especialmente no que se refere à geração e ao tratamento de efluentes. A transposição de soluções desenvolvidas em escala laboratorial para o ambiente industrial demanda, portanto, não apenas a otimização dos processos de aplicação dos corantes, mas também uma avaliação criteriosa dos efeitos desses processos sobre a qualidade dos efluentes gerados.

Dessa forma, o presente estudo busca contribuir para o fortalecimento de práticas mais sustentáveis na indústria têxtil, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, com destaque para: o ODS 6 – Água Potável e Saneamento, ao abordar a qualidade das águas residuais industriais e seus impactos ambientais; o ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ao propor reflexões sobre a inovação em processos produtivos com menor impacto ambiental; o ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, ao discutir práticas produtivas mais eficientes e ambientalmente adequadas; e o ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, ao considerar a redução potencial de impactos ambientais e da pegada de carbono associada à otimização de processos de tingimento e à escolha criteriosa de insumos.

Portanto, este trabalho tem como propósito aprofundar a compreensão dos desafios associados à aplicação industrial de corantes reativos e naturais, com foco na integração entre desempenho técnico e responsabilidade ambiental, contribuindo para uma evolução consistente e fundamentada das práticas de tingimento no setor têxtil.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Comparar os desempenhos técnico, incluindo qualidade visual, solidez e reprodutibilidade da cor, e ambiental relacionados à geração e ao impacto dos efluentes de corantes reativos e naturais aplicados ao tingimento de algodão na tonalidade violeta, conforme o padrão Pantone® 15-3508, com o intuito de avaliar, de forma integrada, a sustentabilidade e a eficiência dos processos de tingimento têxtil, contribuindo para a identificação de alternativas mais ambientalmente responsáveis para o setor.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- a) Tingir e comparar o desempenho tintorial de corantes reativos e naturais aplicados em fios de algodão, considerando a tonalidade violeta (Pantone® 15-3508), com base em parâmetros como fixação, intensidade de cor (K/S), homogeneidade, resistência à lavagem e fricção.
- b) Investigar os mecanismos de interação entre corante e substrato por meio de análises cinéticas, modelagem isotérmica, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), avaliando alterações químicas e morfológicas nas fibras tingidas.
- c) Avaliar os efeitos do tingimento na resistência mecânica dos fios têxteis, investigando possíveis alterações físicas associadas à aplicação das duas classes de corantes.
- d) Caracterizar os efluentes dos processos de tingimento por meio de parâmetros físico-químicos, incluindo pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos dissolvidos totais (TDS) e cloretos, bem como a toxicidade aquática aguda, avaliada por ensaios com *Daphnia magna* (48 h), expressa em concentração efetiva mediana (CE<sub>50</sub>) e fator de toxicidade (FT), além da análise de resíduos de corantes e

composição química, permitindo a comparação entre sistemas com corantes naturais e sintéticos.

e) Analisar a viabilidade técnica e ambiental da substituição parcial ou total de corantes reativos por corantes naturais, considerando critérios de desempenho tintorial, impacto ambiental e alinhamento com práticas sustentáveis adotadas no setor têxtil.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FIBRA DE ALGODÃO

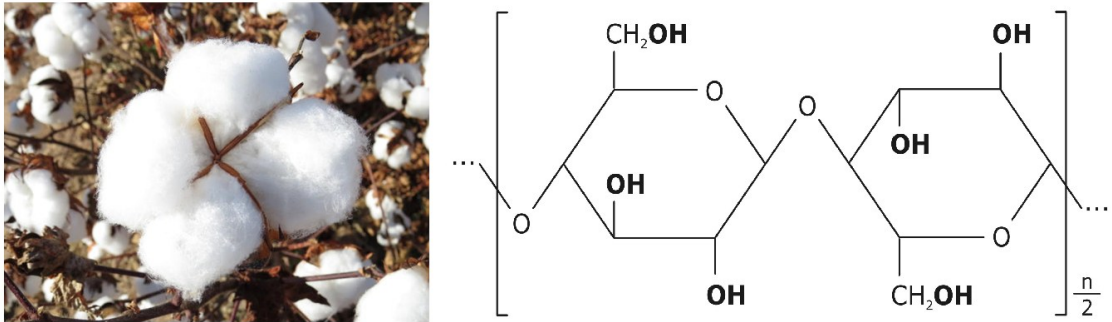
A fibra de algodão tem origem em uma única célula da epiderme do tegumento externo da semente, característica típica dos frutos pertencentes ao gênero *Gossypium*, da família das Malváceas. Por conta dessa origem, seu comprimento pode variar significativamente — desde fibras curtas, conhecidas como línter, que medem cerca de 4 mm, até fibras longas que podem atingir até 60 mm (MALUF & KOLBE, 2003).

O algodão é uma das fibras naturais de maior relevância industrial, principalmente por se tratar de uma célula vegetal única e altamente adaptável aos processos têxteis (MALUF & KOLBE, 2003). Conforme descrito por Wakelyn et al. (2007), suas características estruturais, como as convoluções naturais, e sua capacidade de formar fibras longas e resistentes após o processo de maturação, tornam-no amplamente utilizado na produção de fios e tecidos, seja de forma pura ou combinado com outras fibras.

O algodão destaca-se como uma das fibras naturais mais relevantes para a indústria têxtil, sendo amplamente empregado tanto de forma isolada quanto em mistura com outras fibras, especialmente as sintéticas. Essa fibra possui características desejáveis, como elevado conforto, além de excelente capacidade de absorção de água e corantes (HAJI & BRANCH, 2013). Em virtude dessas propriedades, é largamente utilizada na confecção de materiais têxteis voltados à produção de vestuário, artigos têxteis para o lar, aplicações médicas, uniformes profissionais e roupas esportivas.

A Figura 1 apresenta a fibra de algodão e sua composição. À esquerda, observa-se o capulho do algodão ainda na planta, que representa a matéria-prima *in natura*. A fibra de algodão é composta predominantemente por celulose, um polissacarídeo estrutural que confere resistência mecânica e elevada capacidade de absorção. A organização linear das macromoléculas de celulose no interior da fibra origina uma matriz semicristalina (presença de regiões amorfas e cristalinas), porém, predominantemente orientada, o que torna o algodão muito mais cristalino do que amorfo. A organização molecular estrutural das fibras de algodão é responsável pelas propriedades fundamentais da fibra, como tenacidade, absorção de umidade e afinidade tintorial (MATHER; WARDMAN, 2011).

Figura 1 – Capulho da fibra de Algodão: [à esquerda]; e sua unidade repetitiva da celulose



Fonte: Adaptado de Abrapa (2025) e ROSA *et al.*, 2025)

Para o processamento da fibra e transformação, conforme

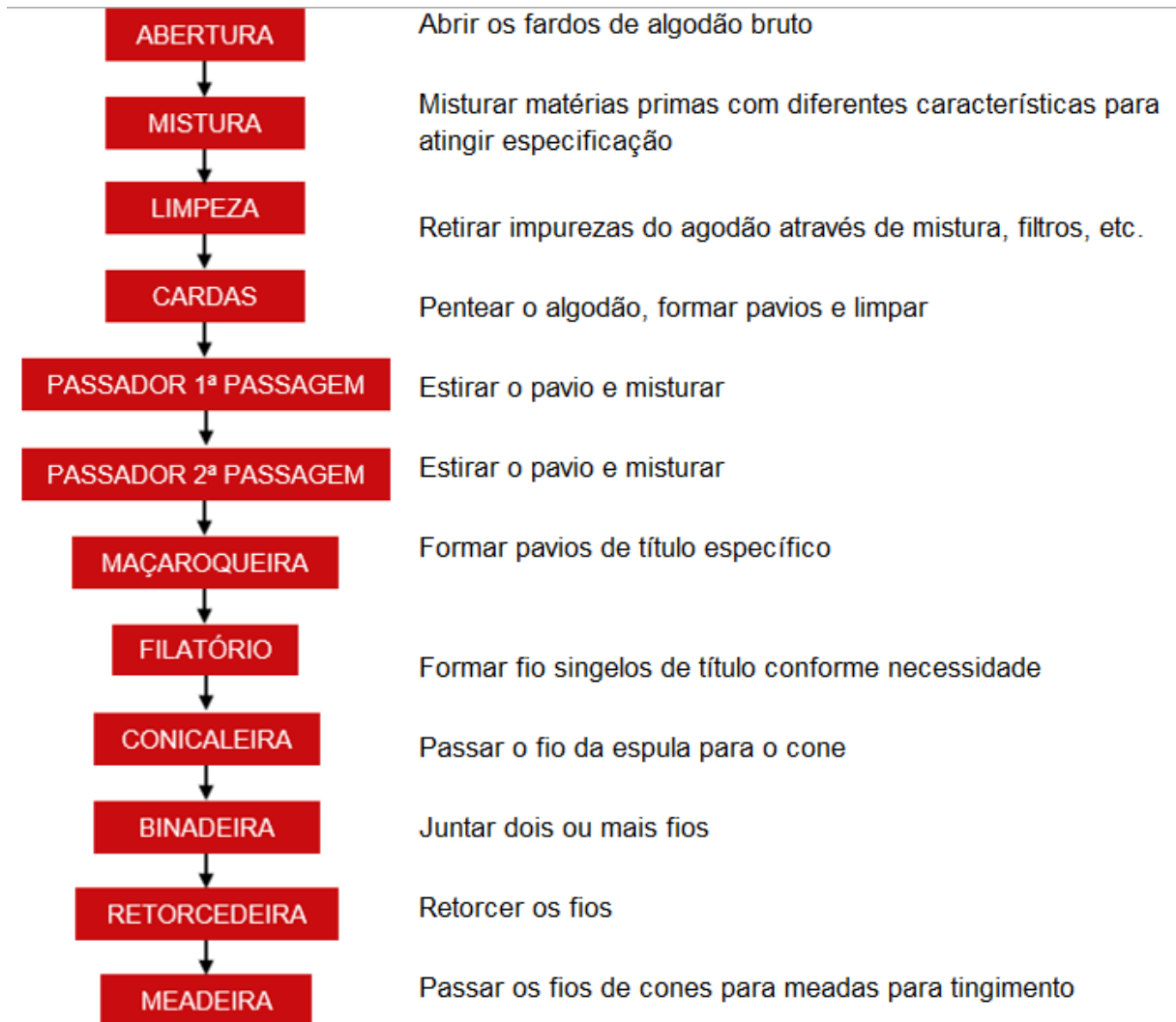
Figura 2, é apresentado o processo produtivo simplificado de uma fiação, conforme descrito na literatura técnica da área têxtil. Para fins de contextualização deste estudo, são representadas as etapas de transformação do algodão em fio, em consonância com o processo convencional de fiação anel, bem como variações no fluxo produtivo em função da aplicação final do fio.

Inicialmente, o algodão previamente beneficiado, isento de cascas e caroços, é compactado em fardos e submetido à classificação. Em seguida, ocorre a abertura e a mistura dos fardos, com o objetivo de promover a homogeneização das fibras.

Na sequência, o material é submetido ao processo de cardagem, responsável pela limpeza, individualização e paralelização das fibras, originando a fita da carda. Essa fita é conduzida aos passadores, equipamentos que promovem a regularização da massa fibrosa e a homogeneização e mistura de lotes. As fitas provenientes dos passadores são então encaminhadas à maçarqueira, na qual ocorre a transformação da fita de maior diâmetro em um pavio, por meio da redução gradual de sua espessura.

A maçarqueira tem como função preparar o pavio para o filatório propriamente dito, no qual ocorre a conversão em fio com a espessura desejada, definida pelos parâmetros de regulação do equipamento. Após a fiação, o fio é bobinado em espulas e pode seguir diferentes rotas produtivas, de acordo com sua aplicação final.

Figura 2 - Esquema de produção do algodão em fição na empresa Círculo



Fonte: Autora (2025)

Embora, de forma convencional, os fios sejam destinados diretamente às etapas de tecelagem ou malharia, em aplicações específicas, especialmente quando o objetivo é o tingimento em forma de fio, o fluxo produtivo pode apresentar variações. Nesses casos, o fio pode ser submetido a operações adicionais, como binagem e retorção, seguidas da formação de meadas. Essa configuração é amplamente utilizada em processos de tingimento em armários, pois favorece a melhor exposição do fio ao banho de tingimento e contribui para maior uniformidade da coloração.

O direcionamento do fio para as etapas de binagem, retorção e formação de meadas é característico de fios destinados a aplicações artesanais e produtos de maior valor agregado, nos quais aspectos estéticos, variações cromáticas controladas e flexibilidade de processamento são desejáveis. Assim, embora não represente a

rota produtiva mais comum da indústria têxtil convencional, esse encaminhamento constitui uma alternativa tecnológica consolidada para aplicações específicas, sendo adotada em função das exigências do produto (ISLAM, 2011; MALUF; KOLBE, 2003).

### 2.1.1 Composição das fibras de algodão

A composição do algodão é majoritariamente formada por celulose ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, que pode corresponder de 88% a 96% do peso total da fibra. Os demais componentes presentes em menor proporção incluem substâncias como pectinas, lipídios, cinzas minerais, proteínas, açúcares e outros compostos secundários (MALUF & KOLBE, 2003). O

Quadro 1 mostra a média da composição química tanto da parede primária junto à cutícula quanto da fibra de algodão em sua totalidade, conforme dados de Maluf e Kolbe (2003).

Quadro 1- Composição química média das fibras de algodão

Compostos	Composição (%)	
	Fibra	Parede primária+cutícula
Celulose	88,0 – 96,0	52
Pectinas	0,7 – 1,2	12
Ceras	0,4 – 1,0	7
Proteínas	1,1 -1,9	12
Cinzas	0,7 -1,6	3
Outros compostos orgânicos	0,5 -1,0	14

Fonte: adaptado de Hauser (2011)

## 2.2 CORANTES

Corantes são substâncias orgânicas que possuem afinidade seletiva por materiais fibrosos, capazes de lhes conferir cor de maneira durável. Segundo Wardman (2017), a coloração decorre da presença de cromóforos, grupos estruturais responsáveis pela absorção da radiação na região visível do espectro

eletromagnético. A interação do corante com o substrato têxtil é promovida por grupos funcionais presentes na molécula, os quais influenciam a solubilidade, a reatividade e a afinidade do corante pela fibra, além de modularem a tonalidade observada.

A eficiência de um corante está relacionada à sua capacidade de penetrar na fibra, aderir-se quimicamente ou fisicamente a ela, e resistir a ações externas como luz, lavagens, fricção e suor (WARDMAN, 2017; HAUSER, 2011). Os diferentes tipos de corantes são desenvolvidos considerando não apenas a cor desejada, mas também as características químicas das fibras e os métodos de aplicação disponíveis.

Clark (2011) propõe uma classificação dos corantes com base em sua afinidade química e no método de aplicação sobre as fibras têxteis. Essa classificação é essencial para garantir a eficiência do tingimento, a solidez da cor e a compatibilidade com o tipo de substrato. Os principais grupos de corantes apresentados pelo autor incluem:

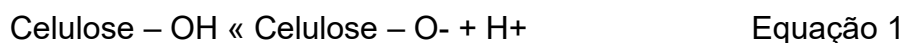
- Corantes Diretos: aplicados em fibras celulósicas, como o algodão, por simples imersão em solução aquosa, sem necessidade de mordente ou reação química.
- Corantes Reativos: formam ligações covalentes com o substrato, especialmente em fibras celulósicas; oferecem excelente solidez à lavagem.
- Corantes Ácidos: possuem caráter aniônico e alta afinidade por fibras proteicas (lã, seda) e poliamidas, formando ligações iônicas com os grupos básicos das fibras.
- Corantes Básicos (Catiônicos): têm afinidade por fibras acrílicas e são fixados por ligação iônica.
- Corantes Dispersos: pouco solúveis em água, são utilizados principalmente em fibras hidrofóbicas como poliéster, sendo aplicados em altas temperaturas.
- Corantes de tina: solúveis apenas sob condições redutoras, são aplicados principalmente em algodão; após o tingimento, são reoxidados para regenerar sua forma insolúvel.
- Corantes Enxofre: aplicados em algodão, são econômicos e de boa solidez, mas apresentam menor sustentabilidade devido à toxicidade de seus subprodutos.

Além dessas categorias, Vankar (2017) menciona os corantes naturais e os corantes de mordente, embora com menor foco técnico, destacando que sua aplicação exige o uso de substâncias auxiliares para fixação eficiente.

A correta escolha do corante depende, portanto, da natureza química da fibra, das condições de tingimento e das propriedades desejadas na peça final. A compatibilidade entre corante e substrato é um dos fatores mais determinantes para o sucesso do processo de tingimento (WARDMAN, 2017; CLARCK, 2011).

### 2.2.1 Corantes reativos

Os corantes reativos são compostos sintéticos amplamente utilizados na indústria têxtil, especialmente no tingimento de fibras celulósicas, devido à sua alta solidez e à capacidade de formar ligações covalentes com a estrutura da fibra (BURKINSHAW, 2016; SHORE, 1995; SALEM, 2000). Esses corantes reagem com os grupos hidroxílicos da celulose, formando uma ligação química estável, o que proporciona excelente resistência à lavagem (BROADBENT, 2001). Para que essa reação ocorra, é necessário que a celulose seja parcialmente ionizada, processo favorecido em meio alcalino conforme Equação 1:



Como enfatiza Salem (2000), a temperatura de aplicação do corante está intimamente relacionada à sua reatividade: corantes com grupos reativos altamente eletrofílicos, como os diclorotriazinílicos, podem ser aplicados a temperaturas mais baixas (30–40 °C), enquanto os de menor reatividade, como os monocloro-s-triazinílicos, exigem temperaturas mais elevadas, em torno de 80 °C (SALEM, 2010; BURKINSHAW, 2016; GULRAJANI, 2010).

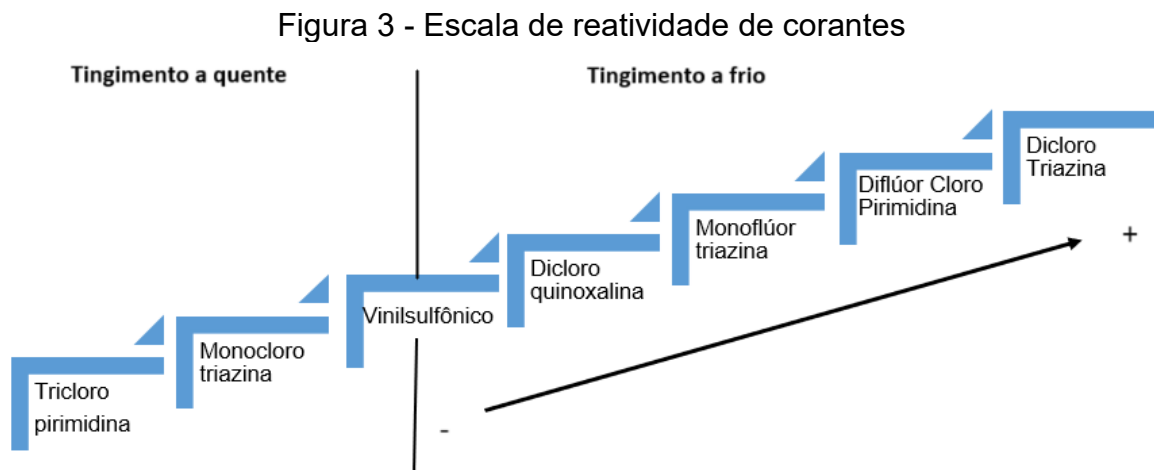
A reatividade, no entanto, não está diretamente associada à qualidade da coloração. O desempenho do corante depende de diversos fatores, como o tipo de substrato, o processo adotado (contínuo ou descontínuo) e o grau de automação industrial (SHORE, 1995). Corantes com reatividade intermediária, como aponta Salem (2000), tendem a apresentar maior previsibilidade industrial.

Três aspectos fundamentais devem ser considerados:

- a) A reatividade não é indicativa direto de qualidade.

- b) Variações de reatividade ocorrem mesmo entre corantes com o mesmo grupo reativo, exigindo análise individual.
- c) Corantes de reatividade intermediária tendem a se adaptar melhor a diferentes condições operacionais (BURKINSHAW, 2016; GULRAJANI, 2010).

A representação gráfica da escala de reatividade dos principais grupos reativos encontra-se apresentada na Figura 3.



Fonte: Adaptada de Salem (2010)

Conforme descrito por Salem (2010), Shore (1995) e Burkinshaw (2016), os corantes reativos podem reagir com fibras celulósicas por dois mecanismos principais: reação por substituição ou reação por adição. No primeiro caso, grupos cloro ou flúor do corante são substituídos por grupos hidroxila da celulose, formando uma ligação covalente. No segundo, grupos sulfato etil sulfona, convertidos em vinilsulfonas sob ação de álcalis, ligam-se diretamente à fibra. Em ambos os mecanismos, pode ocorrer hidrólise, ou seja, reação do corante com a água, resultando em perda de fixação (BURKINSHAW, 2016).

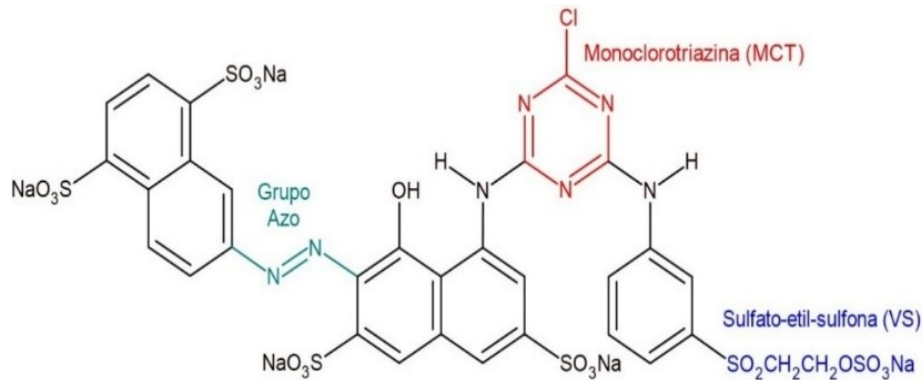
Salem (2010) orienta que o rendimento da reação entre corante e fibra pode ser maximizado mediante controle rigoroso de temperatura, pH e dosagens, de modo a reduzir a ocorrência de hidrólise. Essa abordagem é endossada por autores como Burkinshaw (2016), que também destaca a importância da cinética e da difusão nos processos de esgotamento.

Os corantes reativos a serem utilizados nessa dissertação são apresentados nas figuras 4 a 6.

A estrutura do corante *Reactive Red 195* (RR195), apresentado na

Figura 4, evidencia a presença do grupo azo ligado a anéis aromáticos sulfonados, o que contribui para sua elevada solubilidade e estabilidade em meio aquoso (FARABEGOLI et al., 2010).

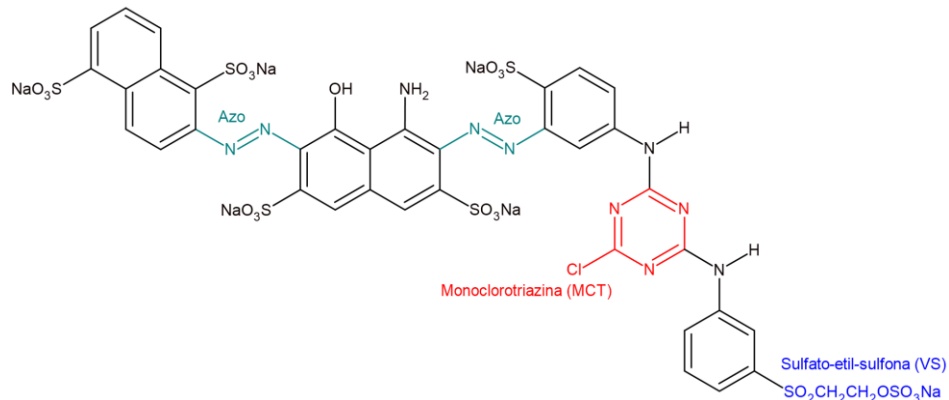
Figura 4 - Estrutura corante Vermelho 195



Fonte: Adaptado de WORLD DYE VARIETY (2025)

O corante *Reactive Blue 222* (RB222) é um corante disazo que apresenta anéis aromáticos sulfonados e dois grupos reativos distintos: monoclorotriazina (MCT) e β-sulfatoetil-sulfona. Em meio alcalino, o grupo β-sulfatoetil-sulfona é convertido à forma vinil-sulfona, a qual reage com as hidroxilas da celulose por adição nucleofílica, formando ligações covalentes estáveis. O grupo monoclorotriazina, por sua vez, também é capaz de formar ligações covalentes com a celulose, porém por um mecanismo de substituição nucleofílica. A presença simultânea desses dois grupos reativos confere ao corante elevada afinidade tintorial, boa solubilidade, estabilidade e eficiência de fixação durante o tingimento (YAGUB et al., 2012). A estrutura molecular do corante é apresentada na Figura 5.

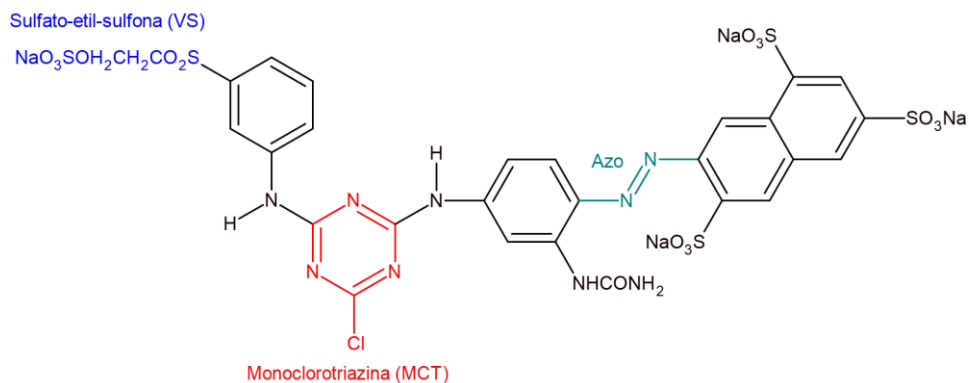
Figura 5 - Estrutura corante azul reativo - 222



Fonte: Adaptado de WORLD DYE VARIETY (2025)

O corante *Reactive Yellow 145* (RY145) é um corante monoazo ligado a anéis aromáticos sulfonados e apresenta dois grupos reativos: monoclorotriazina e  $\beta$ -sulfatoetil-sulfona. Em meio alcalino, este último origina a forma vinil-sulfona, favorecendo a formação de ligações covalentes com fibras celulósicas, além de conferir elevada solubilidade em meio aquoso e boa fixação à fibra (JADHAV et al., 2009). A estrutura molecular do corante é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Estrutura corante reativo Amarelo 145



Fonte: Adaptado de ROSA et al. (2020)

Os corantes reativos empregados na tricromia apresentam grupos funcionais capazes de reagir quimicamente com a celulose, destacando-se os sistemas monoclorotriazina e vinil-sulfona. Esses grupos reativos permitem a formação de ligações covalentes com as hidroxilas da fibra, por mecanismos de substituição ou adição nucleofílica, respectivamente, sob condições alcalinas. Além dos grupos reativos, os corantes apresentam sistemas cromóforos responsáveis pela absorção seletiva da radiação visível e grupos solubilizantes, como sulfônicos, que favorecem

a solubilidade em meio aquoso e a difusão no interior da fibra. A combinação dessas características estruturais é determinante para o desempenho tintorial, a cinética de exaustão e a estabilidade do tingimento (SHORE, 2002; CLARK, 2011; WARDMAN, 2017).

### **2.2.2 Corantes naturais**

Os corantes naturais têm sido utilizados há milênios por diferentes civilizações, constituindo uma das primeiras tecnologias de coloração desenvolvidas pelo ser humano. Registros históricos indicam seu emprego desde a pré-história, com o uso de minerais naturais, passando pela Antiguidade, quando fontes vegetais e animais — como o índigo e a púrpura de Tiro — assumiram papel central na produção têxtil de diferentes culturas (CLARK, 2011; VANKAR, 2017). Em especial nas civilizações orientais, o tingimento vegetal artesanal já demonstrava domínio técnico e simbólico muito antes do advento da industrialização (VANKAR, 2017).

Com o avanço da indústria química no século XIX, os corantes naturais foram progressivamente substituídos pelos sintéticos, sobretudo devido à maior reprodutibilidade, menor custo e facilidade de padronização. Esse processo levou ao declínio do uso industrial dos corantes naturais, restringindo-os, ao longo do século XX, a aplicações artesanais e nichos específicos. No entanto, nas últimas décadas, observa-se uma retomada de interesse, impulsionada principalmente por questões ambientais, de eco-segurança e de sustentabilidade, o que justifica a cronologia apresentada no Quadro 2 (CLARK, 2011; VANKAR, 2017).

Quadro 2 – Cronologia de uso de corantes naturais

<b>Período/Era</b>	<b>Fonte de Corante</b>	<b>Compostos Destacados</b>
Pré-história / Idade da Pedra	Minerais (ocres)	Pigmentos terrosos (óxidos de ferro)
Antiguidade (séculos XV–IV a.C.)	Caracóis <i>Murex</i> (púrpura de Tiro)	6,6'-dibromoíndigo (índigo bromado)
Idade do Bronze / Antiguidade	<i>Indigofera</i> spp., <i>Isatis tinctoria</i> (pastel), <i>Polygonum tinctorium</i>	Indigotina (índigo) e indirubina
Mundo Clássico / Romano	Púrpura de Tiro; uso amplo de índigo	Indigoides; bromados (púrpura)
Época Moderna (séc. XVI–XVIII)	<i>Rubia</i> spp. (garança), cochonilha ( <i>Dactylopius</i> ), pau-brasil, campeche ( <i>Haematoxylum</i> ), quercitrão ( <i>Quercus</i> ), fustete ( <i>Maclura/Chlorophora</i> )	Antraquinonas (alizarina, purpurina, lacaicos), hematoxilina/hematina, quercetina, morina
1856 em diante até Século XIX – declínio dos naturais	Substituição progressiva por sintéticos	-
Século XX	Uso residual de naturais (artesanato/ nichos)	-
Século XXI (retomada sustentável)	Ampliação de fontes vegetais; biomordentes; otimização de extração	Ênfase ambiental e de processo; técnicas modernas

**Fonte:** adaptado de Clark (2011) e Vankar (2017)

No contexto contemporâneo, a literatura destaca que os corantes naturais apresentam vantagens ambientais relevantes, como biodegradabilidade, menor toxicidade e maior compatibilidade com princípios de produção mais limpa. Shahid e Mohammad (2013) ressaltam que essas características contribuem para a redução de riscos ao consumidor e ao meio ambiente. Resultados experimentais apresentados por Sharma et al. (2024) corroboram essa perspectiva, demonstrando redução

significativa da carga orgânica em efluentes provenientes de processos de tingimento com corantes naturais, quando comparados a sistemas baseados em corantes reativos sintéticos.

Do ponto de vista químico, diversas espécies vegetais amplamente estudadas — como *Indigofera tinctoria*, *Rubia tinctorum*, *Curcuma longa* e *Bixa orellana* — são fontes de pigmentos como flavonoides, taninos, antocianinas e carotenoides, responsáveis por uma ampla diversidade cromática (ALEGBe; UTHMAN, 2024). Contudo, a maioria desses compostos apresenta afinidade limitada pelas fibras têxteis, tornando necessária a utilização de mordentes para promover a fixação e a estabilidade da cor.

Nesse sentido, Cristea e Vilarem (2006) destacam o papel dos sais metálicos, como alumínio e ferro, na melhoria da solidez e da intensidade colorística. Estudos posteriores ampliaram essa abordagem ao investigar mordentes alternativos, como o oxiclreto de zircônio, que demonstrou aumento significativo da aderência do corante à fibra, conforme observado por Ibrahim et al. (2010). Mais recentemente, biomordentes à base de extratos vegetais ricos em taninos têm sido estudados como alternativas menos impactantes ambientalmente.

Apesar das vantagens ambientais, a literatura também aponta desafios técnicos associados aos corantes naturais. Silva (2007) e Samanta e Konar (2011) ressaltam limitações como menor reprodutibilidade industrial, variabilidade de tonalidades entre lotes e, em muitos casos, baixa solidez à luz. Tais restrições historicamente limitaram sua aplicação em escala industrial. Entretanto, avanços recentes indicam que essas limitações podem ser mitigadas por meio do controle rigoroso de parâmetros de processo, como pH, temperatura e tempo de tingimento, bem como pela adoção de biomordentes. Witono et al. (2022) demonstraram que, sob condições controladas, é possível alcançar desempenho comparável ao de corantes sintéticos em determinadas fibras.

Adicionalmente, estudos recentes têm incorporado abordagens quantitativas mais robustas para a compreensão do processo de tingimento com corantes naturais. Possidonio et al. (2024) enfatizam a aplicação de modelos cinéticos e isotérmicos, permitindo avaliar taxas de adsorção, energia de ativação e equilíbrio termodinâmico. Essas ferramentas fornecem subsídios técnicos importantes para a otimização do processo e para o potencial escalonamento industrial.

Além dos aspectos técnicos e ambientais, o uso de corantes naturais também carrega uma dimensão cultural e simbólica relevante. Santos et al. (2023) destacam que é possível obter até 80 tonalidades distintas a partir de apenas 14 fontes vegetais, evidenciando a riqueza cromática desses sistemas. Essa diversidade está associada ao resgate e à valorização de técnicas tradicionais de tingimento, como *batik*, *shibori*, *ikat* e *tie-dye*, que vêm sendo reinterpretadas no contexto contemporâneo de produção artesanal e circular.

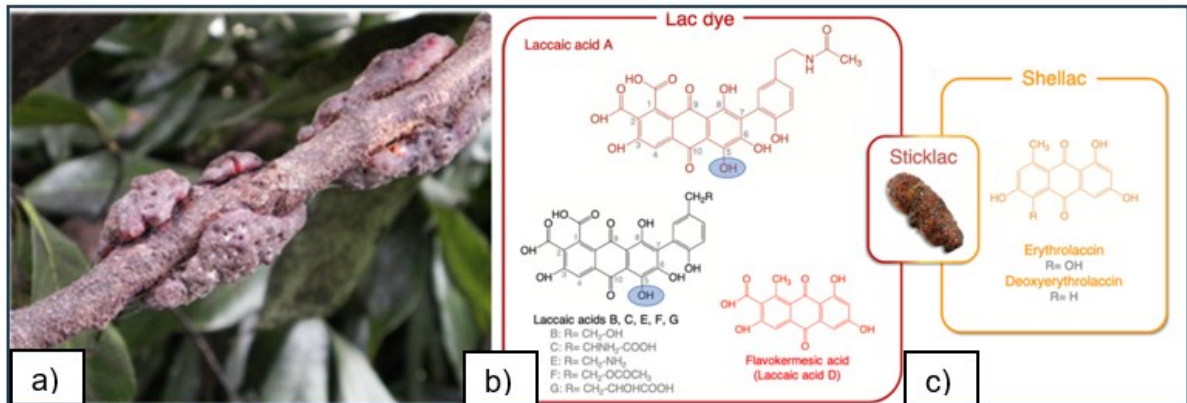
Dessa forma, a literatura aponta um consenso progressivo de que os corantes naturais, quando aplicados com suporte tecnológico adequado e critérios ecológicos bem definidos, podem ocupar um espaço estratégico na indústria têxtil. Sua utilização permite equilibrar desempenho funcional, segurança ambiental e valor cultural, contribuindo para modelos produtivos mais sustentáveis e tecnicamente fundamentados.

#### 2.2.2.1 Corante Viola – corante natural

O corante violeta avaliado neste estudo é um corante natural obtido a partir da resina secretada pelo inseto *Kerria lacca*, sendo caracterizado como um corante do tipo mordentável, conforme descrito em relatório técnico específico sobre o corante violeta à base de *Kerria lacca* (FRATELLI, 2024). Esse corante permite a obtenção de tonalidades que variam do vermelho ao violeta, podendo apresentar maior profundidade cromática mediante tratamentos posteriores.

Do ponto de vista químico, corantes classificados como mordentáveis não possuem grupos reativos capazes de se ligar diretamente à fibra celulósica, sendo necessária a utilização de agentes mordentes, metálicos ou à base de taninos, para promover a interação entre o corante e o substrato têxtil (BECHTOLD; MUSSAK, 2009). A composição química do corante violeta e as estruturas representativas de seus principais constituintes estão ilustradas na Figura 7.

Figura 7 - (a) Resina natural secretada pelo inseto *Kerria lacca* sobre o hospedeiro vegetal; (b) estruturas químicas representativas dos principais ácidos lacaicos (A–G), incluindo o ácido flavokermésico (ácido lacaico D), constituintes do corante lac; (c) estruturas químicas de derivados associados à goma-laca, com destaque para eritrolaccina e desoxieritrolaccina.



Fonte: Adaptado de Crippa et al. (2025)

Segundo informações técnicas apresentadas no relatório FRATELLI (2024), o corante natural de tom violeta é produzido por meio de um processo predominantemente aquoso, sem a utilização de solventes orgânicos. Essa característica é frequentemente associada, na literatura e em materiais técnicos, à redução do impacto ambiental na etapa de produção de corantes naturais. O fabricante também indica que o produto apresenta compatibilidade com diretrizes internacionais voltadas à segurança química e ambiental, como o programa *Zero Discharge of Hazardous Chemicals* (ZDHC) e o *Global Organic Textile Standard* (GOTS). Adicionalmente, são atribuídos ao corante potencial de reaproveitamento dos resíduos gerados no processo produtivo e propriedades funcionais adicionais, como atividade antimicrobiana, aspectos que têm sido mencionados como vantagens potenciais desse tipo de insumo no contexto de propostas de tingimento com menor impacto ambiental.

### 2.3 PROCESSO DE TINGIMENTO DE ALGODÃO POR ESGOTAMENTO

O tingimento constitui uma das etapas mais relevantes da cadeia produtiva têxtil, pois confere cor, valor estético e diferenciação ao produto, influenciando diretamente sua aceitação no mercado consumidor. Conforme destacado por Aguiar

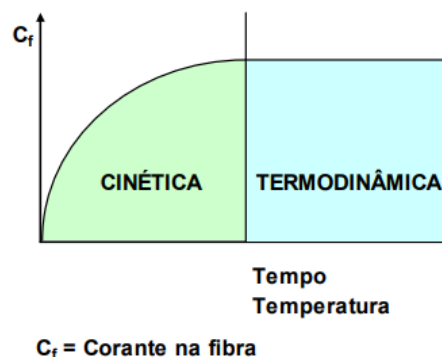
(2022), trata-se de um processo de elevado valor agregado, essencial para a competitividade industrial. Do ponto de vista técnico, o tingimento é um processo físico-químico no qual as moléculas do corante interagem com as fibras têxteis, promovendo a fixação da cor por meio de forças de adsorção e, dependendo do tipo de corante, formação de ligações químicas. Essa interação determina a eficiência tintorial, afetando diretamente a tonalidade, uniformidade e resistência da cor. A compreensão desses mecanismos é essencial para o desenvolvimento de processos sustentáveis e eficazes (BURKINSHAW, 2016; SHORE, 2002).

O tingimento por esgotamento é um método amplamente utilizado para fibras celulósicas, como o algodão. Nesse processo, o corante presente no banho é gradualmente transferido para a fibra até atingir o equilíbrio de absorção (GULRAJANI, 2010). A eficiência dessa etapa é influenciada por fatores como a estrutura molecular da fibra, o tipo de corante empregado e as condições do meio reacional — temperatura, tempo, pH, concentração de eletrólitos e aditivos auxiliares (SALEM, 2010; BRUNS, 2008).

Para fins didáticos, o processo de tingimento pode ser dividido em duas fases principais, conforme ilustrado na Figura 8:

- Fase cinética que abrange a transferência do corante do banho para a superfície da fibra, sua adsorção e difusão;
- Fase termodinâmica que corresponde ao equilíbrio entre corante fixado na fibra e corante residual no banho.

Figura 8 - Etapas do tingimento



Fonte: Adaptado de Salem (2010)

De acordo com Salem (2010), a fase cinética é onde se determina a velocidade de deslocamento do corante para a superfície da fibra, a sua velocidade

de adsorção e de difusão dentro dela e as influências de concentração de corante e eletrólitos, pH, temperatura e relação de banho sobre estas velocidades. E a fase termodinâmica: etapa que estuda os fatores que motivam a fixação do corante na fibra e que são chamados de afinidade.

## 2.4 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DE TINGIMENTO

### 2.4.1 Colorimetria

A colorimetria oferece suporte técnico-científico à quantificação da cor, desde a formulação da receita até a análise objetiva da tonalidade obtida após o tingimento. Segundo Salem (2010), essa ferramenta permite avaliar a intensidade de cor e comparar resultados por meio de dados numéricos obtidos em espectrofotômetro. Essa prática é essencial na indústria têxtil para garantir reprodutibilidade e qualidade de cor, especialmente quando diferentes lotes de produção estão envolvidos (McDONALD; FAIRCLOUGH, 2014).

A intensidade colorística do substrato tingido está diretamente associada à quantidade de corante efetivamente absorvida pela fibra. Conforme Broadbent (2001), essa intensidade pode ser inferida por meio da curva de reflectância, e convertida matematicamente em dados objetivos com base no modelo de *Kubelka-Munk*, expresso pela Equação 2.

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad \text{Equação 2}$$

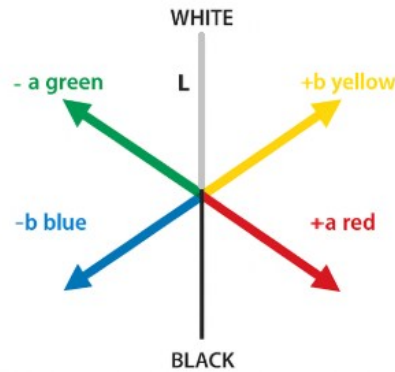
Onde R é a reflectância (fração), K o coeficiente de absorção e S o coeficiente de espalhamento da luz (ŠTĚPÁNKOVÁ; WIENER; RUSINOVÁ, 2011).

Além disso, a análise instrumental da cor com o uso de espectrofotômetros permite quantificar a percepção visual por meio de coordenadas matemáticas, fornecendo resultados objetivos e reprodutíveis para controle de qualidade têxtil. O sistema CIELAB, definido pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), é amplamente utilizado para esse fim devido à sua aproximação com a percepção humana da cor (McDONALD; FAIRCLOUGH, 2014). Conforme demonstra a Figura 9, esse sistema tridimensional é composto por três eixos:

- **L\*** (luminosidade), que varia do preto (0) ao branco (100);

- **a\***, que representa o eixo vermelho–verde (valores positivos indicam vermelho, negativos indicam verde);
- **b\***, que representa o eixo amarelo–azul (valores positivos indicam amarelo, negativos indicam azul).

Figura 9 - Sistema tridimensional das cores CIELAB



Fonte: Adaptado de Data Color (2025)

A combinação dessas coordenadas permite mapear com precisão uma cor no espaço tridimensional e calcular a diferença total de cor ( $\Delta E^*$ ) entre duas amostras. Esse parâmetro é essencial para a comparação entre resultados de tingimento, controle de reprodutibilidade e orientação de ajustes de processo (SHORE, 2002; SCHANDA, 2007). O modelo CIELAB é recomendado por sua sensibilidade perceptiva e aplicabilidade em diversos substratos, sendo especialmente útil na avaliação de tecidos tingidos.

#### 2.4.2 Cinética de tingimento

A cinética de tingimento diz respeito à taxa com que as moléculas do corante se difundem no banho de tingimento e se fixam nas fibras têxteis. Esse comportamento dinâmico é diretamente influenciado por variáveis como temperatura, pH, tipo de fibra, tempo de permanência e concentração do corante no meio (BRUNS et al. 2005). A compreensão da cinética é fundamental para otimizar o processo de tingimento, uma vez que permite prever e controlar a taxa de exaustão do corante, ou seja, a quantidade que efetivamente migra para o substrato, e o tempo necessário para alcançar o equilíbrio ou a saturação da fibra. Além disso, estudos cinéticos

auxiliam na definição de curvas de tingimento e no desenvolvimento de métodos mais sustentáveis e eficientes (SHU et al., 2024).

De acordo com Salem (2010), na fase cinética do tingimento ocorrem três fenômenos principais: a transferência do corante do banho para a fibra, sua adsorção na superfície da fibra e, em seguida, a difusão para o interior dela. A difusão segue os princípios da *Lei de Fick*, conforme Equação 3.

$$\frac{ds}{dt} = -D * A * \frac{dc}{dx} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$\frac{ds}{dt}$  é a taxa de difusão

$\frac{dc}{dx}$  representa o gradiente de concentração

D é o coeficiente de difusão

A é a área de transferência

Na fase cinética ocorre a maior parte dos problemas de tingimento. O fator determinante para um tingimento igualizado e bem difundido reside no controle da velocidade de adsorção do corante pela fibra (SALEM, 2010).

Para a fixação de corantes reativos em fibras celulósicas, a cinética é geralmente complexa e envolve etapas sequenciais de difusão na camada limite, difusão intrapartícula e reação química de fixação, conforme Wardman (2017).

Embora a hidrólise do corante seja uma reação lateral indesejada, ela é tipicamente descrita como de pseudo-primeira ordem devido ao vasto excesso de moléculas de água e ou íons hidroxila no banho, conforme Wang et al. (2025). A fixação covalente do corante na celulose, por sua vez, é predominantemente modelada pela cinética de pseudo-segunda ordem, conforme Wardman (2017).

O ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem sugere que a quimissorção, associada à formação da ligação covalente, é a etapa limitante da velocidade e caracteriza um processo de sorção que depende da concentração de ambos os reagentes, o corante no interior da fibra e os sítios reativos da celulose, conforme Ho e McKay (1999).

Desvios do modelo de pseudo-segunda ordem podem indicar que o controle da velocidade é dominado pela transferência de massa por difusão, especialmente

em altas concentrações de corante ou em sistemas altamente agregados, conforme Wardman (2017).

Os modelos cinéticos mais encontrados na literatura para descrever quantitativamente o processo de adsorção na interface sólido líquido em relação ao tempo sob condições não estabelecidas são o modelo de pseudo-primeira ordem e o modelo de pseudo-segunda ordem, conforme Silva (2013) e Giacomini (2014).

A equação que descreve a cinética de pseudo-primeira ordem, linearizando considerando  $t$  é expressa conforme a Equação 4 e refere-se a taxa de sorção dos solutos a partir de uma solução líquida.

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad \text{Equação 4}$$

Integrando a Equação 1 para as condições de contorno sendo  $t=0$  a  $t=t$  e  $q=0$  a  $q=q$ , e posterior rearranjo, obtém-se a sua forma linearizada, conforme a Equação 5.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad \text{Equação 5}$$

Em que  $q_e$  e  $q_t$  representam as capacidades de adsorção ( $\text{mg g}^{-1}$ ) em equilíbrio e no tempo  $t$ , e  $k_1$  a constante de velocidade de pseudo-primeira ordem ( $\text{min}^{-1}$ ) (HO E MCKAY, 1999).

A partir do gráfico de  $\ln(q_e - q_t)$  em função de  $t$ , obtém-se uma reta em que o coeficiente angular é o valor de  $-k_1$  e o coeficiente linear é o de  $\ln(q_e)$ . Com isso, a constante cinética ( $k_1$ ) e a massa do soluto que foi adsorvida em equilíbrio ( $q_e$ ) são determinadas pelo coeficiente angular e pelo coeficiente linear, respectivamente (HO E MCKAY, 1999; AZIZIAN, 2004).

Já o modelo de pseudo-segunda ordem refere-se ao comportamento cinético contemplando todo o processo de adsorção, considerando a reação do adsorvato no sítio ativo do adsorvente pela quimissorção como uma etapa determinante da taxa de adsorção, e a lei de velocidade para este sistema é expressa pela Equação 6 (HO E MCKAY, 1999).

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad \text{Equação 6}$$

Em que  $k_2$  é a constante cinética de adsorção de pseudo-segunda ordem ( $\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$ ). Da mesma forma que a pseudo-primeira ordem, ao integrar para as condições de contorno  $t=0$  a  $t=t$  e  $q=0$  a  $q=q$ , e após o rearranjo da equação, obtêm-se a equação de forma linear, como apresenta a Equação 7.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e x^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{Equação 7}$$

O gráfico de  $t/q$  versus  $t$  fornece uma reta em que o coeficiente angular é  $1/k_2 q_e^2$  e o coeficiente linear é  $1/q_e$ . Portanto, a massa de soluto adsorvida por grama de sólido em equilíbrio ( $q_e$ ) e a constante cinética ( $k_2$ ) podem ser determinadas a partir do coeficiente angular e do coeficiente linear, respectivamente (HO E MCKAY, 1999; AZIZIAN, 2004).

### 2.4.3 Fase termodinâmica - Isotermas de tingimento

As isotermas de tingimento são gráficos que descrevem a relação entre a concentração de corante no banho e a quantidade de corante adsorvida pelas fibras a temperatura constante. Conforme Hauser (2011), ao final da etapa de esgotamento ocorre a distribuição de corante entre a fase fibra e a fase líquida, e esse equilíbrio pode ser representado por isotermas (Nernst, Freundlich e Langmuir) que relacionam a quantidade de corante na fibra com a concentração remanescente no banho a temperatura constante.

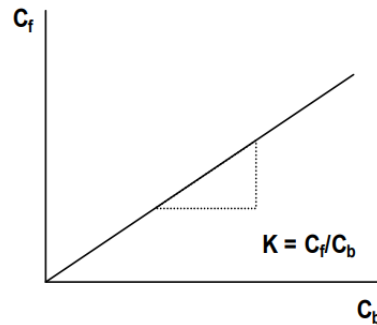
A mesma observação é descrita por Wardman (2017), evidenciando que a fase termodinâmica do tingimento é avaliada quando o sistema atinge equilíbrio entre o corante na fibra e no banho a temperatura constante, permitindo traçar:

a) A isoterma de Nernst descreve uma relação linear entre a concentração de corante na fibra ( $C_f$ ) e no banho ( $C_b$ ), através de uma constante  $K$  expressa pela equação 8.

$$K = \frac{C_f}{C_b} \quad \text{Equação 8}$$

Esse modelo, conforme Figura 10 assume que não há saturação dos sítios de fixação, sendo adequado para sistemas ideais e diluídos. É aplicável especialmente em tingimentos com corantes diretos ou de baixa afinidade, nos estágios iniciais da absorção.

Figura 10 - Isoterma de Nernst



Fonte: Adaptado de Wardman (2017)

b) A isoterma de Langmuir considera a existência de sítios limitados de fixação na fibra sendo apresentada pela equação 9.

$$C_f = \frac{(K * S_f * C_b)}{(1 + K * C_b)} \quad \text{Equação 9}$$

onde:

$C_f$  é a concentração de corante na fibra no equilíbrio (g corante / g fibra).

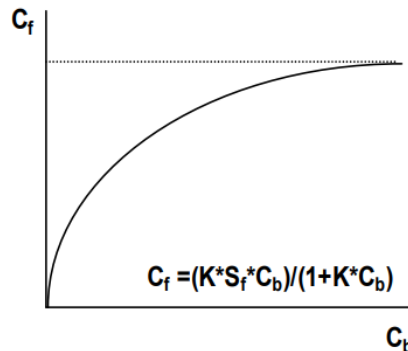
$C_b$  é a concentração de corante no banho no equilíbrio (g/L).

$S_f$  é a capacidade máxima de fixação da fibra, mostra a saturação dos sítios ativos.

$K$  é a constante de afinidade entre o corante e a fibra.

Esse modelo, visto na Figura 11 representa sistemas em que ocorre saturação dos sítios ativos ( $S_f$ ), sendo amplamente utilizada para descrever o comportamento de corantes reativos e diretos com afinidade elevada pelas fibras celulósicas.

Figura 11 - Isoterma de Langmuir



Fonte: Adaptado de Wardman (2017)

c) A isoterma de Freundlich é uma equação empírica utilizada para sistemas heterogêneos, expressa pela equação 10.

$$k = \frac{C_f}{C_b^n} \quad \text{Equação 10}$$

onde:

$C_f$  é a concentração de corante na fibra no equilíbrio (g corante / g fibra).

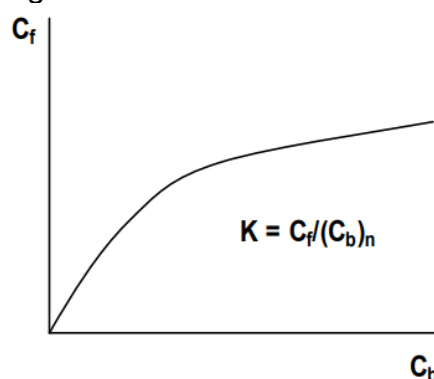
$C_b$  é a concentração de corante no banho no equilíbrio (g/L).

$K$  é a constante de Freundlich, relacionada à capacidade de adsorção do sistema.

$n$  é o índice de heterogeneidade ou grau de não linearidade, que indica como a afinidade de adsorção varia com a concentração do corante.

Ao contrário da isoterma de Langmuir, ela não apresenta um limite claro de saturação, sendo indicada para corantes naturais, onde a superfície da fibra apresenta diferentes tipos de sítios de adsorção. O parâmetro  $n$  representa o grau de não linearidade. A Figura 12 representa o comportamento da isoterma.

Figura 12 - Isoterma de Freundlich



Fonte: Adaptado de Wardman (2017)

A escolha do modelo isotérmico mais adequado para interpretar os dados de tingimento é crucial para prever o comportamento do corante em diferentes concentrações segundo Zaroni e Yamanaka (2016). Os autores apresentam que o modelo de Langmuir, por exemplo, pressupõe uma superfície uniforme com sítios equivalentes de adsorção, o que pode ser mais representativo para fibras têxteis tratadas quimicamente. Já a isoterma de Freundlich se ajusta melhor aos corantes naturais, que apresentam estrutura química complexa e interações múltiplas com as fibras. A aplicação dessas isotermas contribui para a redução de perdas de corante e otimização do consumo hídrico.

Em complemento, Clark (2011) apresenta as três isotermas relacionadas e discute suas principais limitações, como o caráter empírico dos parâmetros de Freundlich e a ausência de saturação definida nesse modelo. O autor também demonstra situações em que a isoterma de Langmuir pode ajustar sistemas com algodão, especialmente quando há competição por sítios ativos, como em misturas de corantes diretos.

A fase termodinâmica ocorre após o esgotamento do corante na fibra, quando o sistema atinge equilíbrio entre o corante fixado ( $C_f$ ) e o corante remanescente no banho ( $C_b$ ). Esse equilíbrio é influenciado por fatores como temperatura, vibração molecular e estrutura da fibra, podendo ser representado por diferentes modelos isotérmicos (HAUSER, 2011; WARDMAN, 2017).

O Modelo de Freundlich é particularmente útil para descrever sistemas de adsorção heterogênea ou multicamadas, como é comum em corantes naturais e adsorventes modificados. O parâmetro  $n$  da isoterma  $1/n$  é crucial: quando o valor de  $n$  é maior que 1 ( $1/n < 1$ ), a adsorção é considerada favorável. No entanto, um valor de  $n$  menor que 1 ( $1/n > 1$ ) indica um processo de adsorção desfavorável (VANKAR, 2017). Em sistemas de tingimento com corantes naturais, a adsorção depende fortemente da interação com mordentes ou agentes cationizantes.

Um ajuste insatisfatório a ambos os modelos de Langmuir e Freundlich é um indicativo de que a adsorção é instável, reversível ou envolve interações complexas que podem ser descritas melhor por modelos alternativos, como o modelo de Temkin que considera a variação do calor de adsorção com a cobertura de sítios (VANKAR, 2017).

Além dos modelos clássicos de Langmuir e Freundlich, a literatura reconhece que sistemas reais de adsorção em substratos têxteis frequentemente apresentam

superfícies energeticamente heterogêneas e interações não ideais, especialmente no caso de corantes naturais aplicados a fibras celulósicas modificadas. Nesses casos, modelos alternativos, como o de Temkin, são citados como abordagens complementares, por considerarem a variação da energia de adsorção em função da cobertura dos sítios, sendo mais adequados para descrever sistemas com adsorção fraca e multissítio (CLARK, 2011; HAUSER, 2011; ZANONI; YAMANAKA, 2016).

## 2.5 EFLUENTES GERADOS NO PROCESSO DE TINGIMENTO

A indústria têxtil é reconhecida como uma das principais geradoras de efluentes industriais, cujas características variam em função dos processos adotados, dos substratos tratados e dos insumos químicos empregados ao longo do beneficiamento. De modo geral, os efluentes provenientes das etapas de tingimento e acabamento podem apresentar elevada carga orgânica, coloração residual persistente, sólidos dissolvidos totais e compostos auxiliares, como surfactantes e eletrólitos, os quais impõem desafios significativos aos sistemas convencionais de tratamento (YAGUB et al., 2012; ROSA et al., 2020).

Nesse contexto, a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) desempenha papel central na gestão ambiental da indústria têxtil, sendo responsável por adequar os efluentes gerados aos limites regulatórios antes do descarte em corpos hídricos ou do reuso industrial. A eficiência desses sistemas está diretamente relacionada à composição dos efluentes encaminhados, que reflete as escolhas tecnológicas realizadas ao longo do processo produtivo, especialmente nos processos de tingimento, nos quais ocorre a maior introdução de corantes e auxiliares químicos no meio aquoso (ROSA et al., 2020; ISLAM et al., 2023).

A adoção de alternativas tecnológicas no tingimento, como o uso de corantes naturais ou a otimização de processos envolvendo corantes sintéticos, tem sido associada às exigências ambientais contemporâneas e à crescente incorporação de diretrizes de sustentabilidade no setor têxtil. Entretanto, a literatura destaca que a avaliação ambiental desses sistemas deve considerar não apenas a origem do corante, mas também as etapas de preparo do substrato, os agentes auxiliares empregados, a relação de banho e as condições operacionais, uma vez que esses fatores influenciam diretamente a composição, a carga poluidora e a tratabilidade dos efluentes gerados (BECHTOLD et al., 2006; PICCOLI, 2008; ZHU et al., 2024).

Essas considerações tornam-se particularmente relevantes quando se analisam diretrizes ambientais adotadas pela indústria têxtil, as quais estabelecem critérios restritivos quanto à presença de substâncias perigosas, metais e parâmetros de efluentes. Nesse contexto, programas e certificações amplamente reconhecidos no setor, como o *Global Organic Textile Standard (GOTS)* e a iniciativa *Zero Discharge of Hazardous Chemicals (ZDHC)*, reforçam a necessidade de controle rigoroso dos insumos químicos e da composição dos efluentes ao longo do processo produtivo, sem, contudo, substituir a análise técnica e científica dos sistemas de tingimento (GLOBAL ORGANIC TEXTILE STANDARD, 2023; ZDHC FOUNDATION, 2022).

### **2.5.1 Impactos no Tratamento de Efluentes Têxteis**

Uma das principais preocupações ambientais associadas ao tingimento têxtil refere-se à complexidade dos efluentes gerados, os quais podem comprometer a eficiência dos sistemas convencionais de tratamento. A caracterização físico-química desses efluentes frequentemente evidencia elevados valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos dissolvidos totais (TDS) e coloração residual de difícil remoção, exigindo abordagens de tratamento compatíveis com os limites regulatórios e com as metas de desempenho ambiental adotadas pelo setor têxtil (YAGUB et al., 2012; ROSA et al., 2020; ISLAM et al., 2023).

No caso dos corantes sintéticos, em especial os corantes reativos amplamente empregados no tingimento de fibras celulósicas, a literatura aponta que a presença de estruturas químicas complexas, aliada à taxa de fixação parcial do corante à fibra, resulta em efluentes com elevada carga de cor residual e sais inorgânicos. Adicionalmente, muitos corantes reativos pertencem à classe dos corantes azo, cuja degradação, sob determinadas condições anaeróbias, pode envolver a clivagem da ligação azo e a formação de aminas aromáticas, compostos indesejáveis do ponto de vista ambiental, o que reforça a complexidade associada ao tratamento desses efluentes (FARABEGOLI et al., 2010; ISLAM et al., 2023).

Em função dessas características, os efluentes provenientes do tingimento com corantes reativos tendem a apresentar pH alcalino, elevada salinidade e coloração persistente, demandando, em muitos casos, a adoção de processos complementares ou tecnologias avançadas de tratamento, como etapas físico-

químicas e oxidativas associadas a sistemas biológicos, visando à remoção eficiente da cor e à redução da carga orgânica antes do descarte ou reuso (ROSA et al., 2020; SHU et al., 2024; ZHU et al., 2024). Esses aspectos dialogam diretamente com os requisitos técnicos estabelecidos por iniciativas como a ZDHC, que enfatizam a redução da descarga de substâncias perigosas e o controle rigoroso dos parâmetros de efluentes, sem, entretanto, prescrever soluções tecnológicas específicas (ZDHC FOUNDATION, 2022).

De forma comparativa, os efluentes gerados a partir de processos de tingimento com corantes naturais podem apresentar comportamento distinto, dependendo das condições de aplicação. Estudos indicam que, quando não há o uso de mordentes metálicos e quando a carga orgânica introduzida no sistema é adequadamente controlada, esses efluentes podem apresentar maior biodegradabilidade e menor persistência de cor, favorecendo sua compatibilidade com sistemas de tratamento biológico convencionais (BECHTOLD et al., 2006; PICCOLI, 2008; PIZZICATO et al., 2023).

Entretanto, a literatura também ressalta que o desempenho ambiental dos processos com corantes naturais não deve ser generalizado. Fatores como a origem do material vegetal, o método de extração, a concentração aplicada e o uso de agentes auxiliares influenciam diretamente a composição e a carga poluidora dos efluentes gerados. O emprego de mordentes metálicos, por exemplo, pode introduzir metais no sistema e comprometer a tratabilidade dos efluentes, além de restringir a compatibilidade do processo com diretrizes ambientais e critérios adotados por certificações voltadas à sustentabilidade no setor têxtil, como o GOTS, que estabelece limites específicos para o uso de determinados insumos e para a qualidade dos efluentes gerados (PICCOLI, 2008; VANKAR, 2017; MAI et al., 2024; GLOBAL ORGANIC TEXTILE STANDARD, 2023).

Nesse sentido, análises comparativas recentes baseadas em abordagens de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) indicam que tanto os processos com corantes reativos quanto aqueles com corantes naturais apresentam impactos ambientais específicos, os quais devem ser avaliados de forma integrada, considerando consumo de água, energia, insumos químicos e geração de efluentes. Esses estudos reforçam a importância de uma análise criteriosa e contextualizada dos sistemas de tingimento, evitando associações simplificadas entre origem do corante e desempenho ambiental,

e permitindo a identificação de estratégias efetivas de mitigação ambiental no setor têxtil (ZHU et al., 2024).

#### **a) Efluentes de Corantes Reativos**

Os corantes reativos, amplamente empregados no tingimento de fibras celulósicas, geram efluentes com características críticas do ponto de vista ambiental. Esses efluentes apresentam, em geral, pH alcalino, frequentemente entre 9,0 e 11,0, elevada carga salina — podendo atingir valores da ordem de até 100 g/L de cloreto de sódio (NaCl) ou sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) — e coloração intensa e persistente. Além disso, a taxa de fixação dos corantes reativos é limitada, situando-se em torno de 60–70%, o que resulta em quantidades significativas de corante residual no banho de tingimento, dificultando o atendimento a padrões ambientais e diretrizes de descarga mais restritivas (ISLAM et al., 2023; SHU et al., 2024).

A presença de corantes azo e de seus subprodutos nos efluentes de tingimento reativo representa um risco ambiental adicional, uma vez que esses compostos podem ser transformados, em condições anaeróbias, em aminas aromáticas tóxicas e potencialmente carcinogênicas. Em função dessa complexidade, o tratamento desses efluentes frequentemente requer a aplicação de processos avançados, como ozonização, processos oxidativos avançados, fotocatálise, sistemas de membranas ou combinações de radiação ultravioleta com peróxido de hidrogênio, os quais, embora eficazes, apresentam elevado custo operacional e energético (ISLAM et al., 2023).

#### **b) Efluentes de Corantes Naturais**

Os efluentes provenientes de processos de tingimento com corantes naturais apresentam, de modo geral, características menos agressivas ao meio ambiente quando comparados aos efluentes de corantes sintéticos. De acordo com Cristea e Vilarem (2006) e Bechtold et al. (2006), esses efluentes tendem a apresentar pH levemente ácido a neutro, geralmente entre 5,5 e 7,0, baixa ou inexistente carga salina, coloração menos persistente e ausência de compostos recalcitrantes.

Quando não são utilizados mordentes metálicos, os efluentes resultantes do tingimento com corantes naturais apresentam elevada biodegradabilidade e boa compatibilidade com tecnologias convencionais de tratamento biológico, como lagoas aeradas e reatores anaeróbios. Shahid e Mohammad (2013) destacam que essa

característica favorece a remoção de matéria orgânica e a redução da carga poluidora, além de atender a princípios associados à produção mais limpa e a programas de certificação ambiental amplamente adotados pela indústria têxtil, como GOTS e ZDHC.

Adicionalmente, o reaproveitamento de resíduos vegetais na produção de corantes naturais e o uso de mordentes alternativos, como taninos, agentes cationizantes ou alúmen em baixas concentrações, são apontados na literatura como fatores que contribuem para a sustentabilidade desses processos. Mesmo em aplicações em escala industrial, estudos indicam que os efluentes provenientes de corantes naturais não comprometem significativamente parâmetros como DBO, turbidez ou oxigenação dos corpos hídricos receptores, desde que os processos sejam adequadamente controlados e alinhados às exigências normativas vigentes (NAMBELA, 2025; CRISTEA; VILAREM, 2006).

Em síntese, a literatura permite estabelecer uma análise comparativa entre os efluentes gerados por processos de tingimento com corantes reativos e naturais, conforme apresentado no Quadro 3, evidenciando diferenças significativas quanto à composição, tratabilidade e impacto ambiental desses sistemas (ISLAM et al., 2023; SANTOS et al., 2023; PICCOLI, 2008).

Quadro 3 - Comparativo de Efluentes de tingimento

<b>Parâmetro Técnico</b>	<b>Corantes Reativos</b>	<b>Corantes Naturais</b>
pH do efluente	Elevado (9,0–11,0), em função do uso de álcalis durante o processo.	Levemente ácido a neutro (5,5–7,0), dependendo da planta utilizada.
Carga salina	Alta – até 100 g/L de sal (NaCl ou Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) usados para fixação do corante	Geralmente baixa ou ausente, devido à dispensa de sais na maioria das aplicações.
Fixação do corante	Parcial (~60–70%), com grande fração residual no banho.	Variável, mas pode ser aumentada com mordentes naturais ou técnicas eco-friendly.
Toxicidade potencial	Elevada – presença de subprodutos tóxicos e cor persistente no efluente.	Baixa – compostos de origem vegetal, geralmente biodegradáveis e atóxicos
Biodegradabilidade	Baixa – necessidade de tratamentos avançados como os processos oxidativos.	Alta – resíduos orgânicos assimiláveis por sistemas biológicos.
Cor residual do efluente	Intensa e estável, resistente à degradação.	Suave e degradável por ação da luz ou de microrganismos.
Necessidade de tratamento	Complexa – requer pH-neutralização, remoção de sal, processos avançados (ozônio, UV).	Tratamento convencional (biológico) geralmente suficiente.

**Fonte:** Elaborado com base nos dados e análises dos estudos de Islam et al. (2023), Santos et al. (2023) e Piccoli (2008).

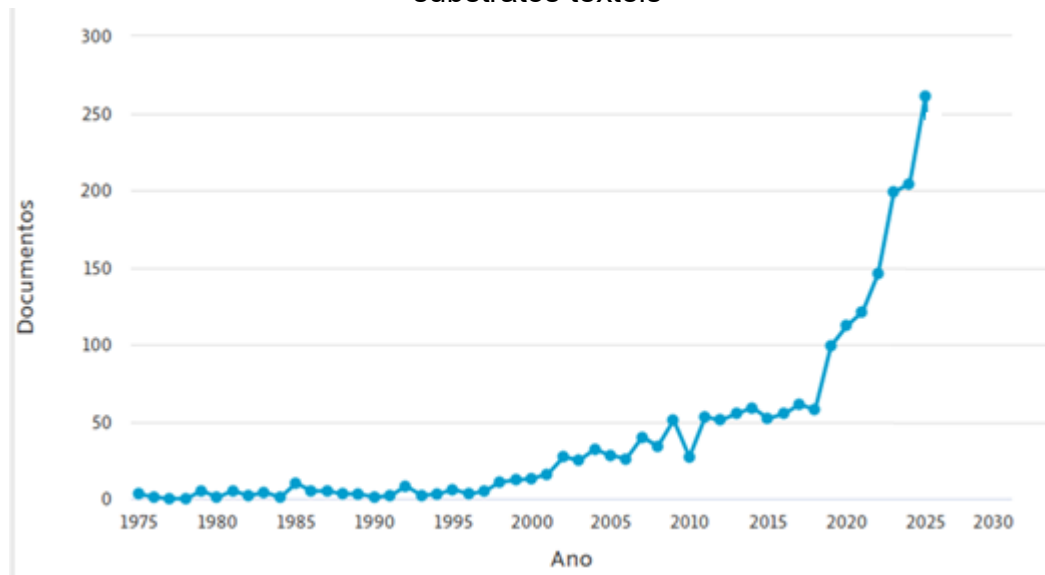
Do ponto de vista do tratamento de efluentes, a substituição de sais metálicos por alternativas tecnológicas, como cationizantes poliméricos e auxiliares livres de metais pesados, tem sido apontada como estratégia eficaz para reduzir a fração não biodegradável e a carga de metais nos efluentes encaminhados às ETEs. Essa abordagem tende a simplificar as etapas de tratamento, reduzir a geração de lodo perigoso e aumentar a eficiência dos processos biológicos, estando alinhada aos princípios da química verde, da produção mais limpa e às diretrizes de programas como ZDHC e GOTS, conforme discutido por Shahid e Mohammad (2013) e Silva (2015).

## 2.6 ESTUDOS SOBRE TINGIMENTO COM CORANTES NATURAIS

Nos últimos dez anos, os estudos sobre corantes naturais aplicados a substratos têxteis têm apresentado um crescimento expressivo, impulsionado por demandas ambientais, mudanças regulatórias e pela busca por tecnologias mais sustentáveis.

Esse movimento é refletido nos dados bibliométricos apresentados na Figura 13, análise na base de dados Scopus (Elsevier), realizada em novembro de 2025 com os termos “natural dyes” and “textile”.

Figura 13 - Crescimento das publicações sobre corantes naturais aplicados a substratos têxteis



Fonte: Scopus (2025)

Observa-se, na Figura 13, que a produção científica sobre “natural dyes” and “textile” permaneceu baixa e relativamente constante entre 1975 e o final da década de 1990, com poucos artigos publicados por ano. A partir dos anos 2000 inicia-se um aumento gradual, que se intensifica após 2010 e, sobretudo, depois de 2015, quando a curva assume um comportamento claramente ascendente. Entre 2020 e 2024 o número de publicações anuais ultrapassa 100 documentos e continua crescendo até atingir o patamar de aproximadamente 260 artigos em 2025, configurando o pico da série histórica. A queda observada em 2026 está associada ao fato de se tratar de um período ainda em indexação, mas, no conjunto, o gráfico evidencia a consolidação

recente do tingimento com corantes naturais como tema de interesse central na literatura internacional.

A partir de 2015, diversos pesquisadores passaram a se dedicar ao aprofundamento técnico da extração, aplicação e funcionalização desses corantes, consolidando uma base científica robusta que amplia sua viabilidade como alternativa aos corantes sintéticos.

Silva (2015) investigou a aplicação de corantes naturais com propriedades antimicrobianas e de proteção UV em tecidos de algodão e viscose. O estudo demonstrou que, com o uso de mordentes específicos e métodos adequados de extração por decocção, foi possível reduzir até 75% da flora bacteriana e alcançar absorção de radiação UV acima de 90%. Shabbir e Ahmed (2017) reforçaram essa perspectiva ao aplicar tingimento com urucum, hibisco e pau-brasil em algodão, utilizando mordentes metálicos. Os resultados indicaram elevada fixação das cores e índice de solidez à lavagem superior a 4, o que aponta boa durabilidade e aderência ao substrato.

Dai, Fan e Zhang (2019) realizaram uma análise detalhada da adsorção de corantes naturais em algodão ativado, empregando resíduos vegetais como cascas de frutas, bagaço de cana e casca de arroz como fontes de compostos fenólicos. Os autores observaram taxas de adsorção entre 80% e 95%, com bom ajuste aos modelos de Langmuir e Freundlich, contribuindo para o entendimento dos mecanismos de interação entre corante natural e substrato celulósico. Em complemento, Aguiar et al. (2022) destacaram que a durabilidade das cores em tecidos tingidos com corantes naturais está fortemente associada à adequação das etapas de beneficiamento, como lavagem, alvejamento e fixação, apontando esses fatores como desafios técnicos relevantes para a consolidação industrial desses processos.

Estudos mais recentes evidenciam avanços tanto na funcionalização quanto na sustentabilidade do tingimento com corantes naturais. Pizzicato et al. (2023) demonstraram que o encapsulamento de pigmentos naturais em ciclodextrinas pode melhorar significativamente a estabilidade térmica e a fixação da cor em fibras como algodão, lã e seda, mantendo valores de  $\Delta E^*$  inferiores a 1,5 após cinco ciclos de lavagem. Shu et al. (2024) comprovaram a viabilidade do reaproveitamento de água previamente utilizada em tingimentos com extratos naturais filtrados, preservando

mais de 90% da intensidade colorística, o que reforça o potencial de redução do consumo hídrico nesses sistemas.

No que se refere aos parâmetros ambientais e energéticos, Zhu et al. (2024) compararam a pegada de carbono de processos de tingimento com corantes naturais e reativos, concluindo que os sistemas baseados em corantes naturais podem resultar em reduções de até 35% nas emissões de carbono. Nessa mesma perspectiva, Mai et al. (2024) investigaram o uso de extratos de madeira no tingimento de algodão, demonstrando que diferentes procedimentos de mordentagem influenciam significativamente a intensidade da cor, a uniformidade e as propriedades de solidez, além de possibilitar processos mais simplificados, como a mordentagem simultânea, com potencial redução de etapas, consumo de água e energia.

Por fim, Nambela (2025) discutiu desafios estruturais associados à cadeia produtiva dos corantes naturais, como a padronização cromática e o acesso regular à matéria-prima, enquanto Santos et al. (2023) enfatizaram a necessidade de políticas públicas voltadas ao fortalecimento de cadeias produtivas baseadas em insumos naturais, alinhadas aos princípios da economia circular e da produção mais sustentável.

Esse avanço científico acompanha a crescente preocupação global com o uso racional da água. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2024), a agricultura responde por aproximadamente 70% das retiradas de água doce no mundo, seguida pela indústria (cerca de 20%) e pelos usos domésticos (12%). No setor industrial, a indústria têxtil destaca-se como grande consumidora, tendo como principal resíduo a própria água utilizada nos processos produtivos — especialmente nos banhos de tingimento, nos quais corantes, mordentes e auxiliares químicos comprometem a qualidade dos efluentes.

Nesse contexto, torna-se essencial compreender o comportamento dos corantes naturais não apenas sob o ponto de vista técnico, mas também ambiental, com ênfase na composição e no tratamento das águas residuais geradas.

No Quadro 4 são apresentadas as principais características dos estudos revisados, com foco nas metodologias de aplicação, tipos de corantes utilizados, substratos avaliados e resultados ambientais associados:

Quadro 4 - Pesquisas relevantes referente aos corantes naturais

<b>Corante</b>	<b>Método de Extração</b>	<b>Substrato</b>	<b>Técnica de Aplicação</b>	<b>Resultado/Conclusão</b>	<b>Referência autor (ano)</b>
<i>Bixa orellana</i> L., <i>Curcuma longa</i> L., <i>Allium cepa</i> L.	Extração aquosa e alcoólica por decocção	Algodão, viscose, lã	Tingimento com propriedades antimicrobianas e proteção UV	Redução de 75% da flora bacteriana e absorção UV acima de 90%.	Gomes da Silva (2015)
<i>Tagetes</i> spp.; <i>Tanacetum</i> spp.	Extração aquosa por decocção	Algodão, lã, fibras artificiais	Tingimento por exaustão	Boa afinidade tintorial; variação cromática conforme o tipo de fibra e condições de aplicação	Kertész et al. (2018)
Resíduos vegetais (cascas de frutas, bagaço de cana e casca de arroz)	Secagem, moagem e extração aquosa	Algodão ativado	Adsorção em solução aquosa	Taxas de adsorção entre 80–95% ajustada aos modelos de Langmuir e Freundlich.	Dai, Fan e Zhang (2019)
Raízes de <i>Rubia cordifolia</i> L.	Extração aquosa e alcoólica	Algodão, lã	Tingimento por exaustão	Alta intensidade colorística; propriedades de solidez dependentes do pH e da mordentagem	Haji et al. (2019)
Rizomas de cúrcuma ( <i>Curcuma longa</i> L.)	Extração aquosa otimizada	Algodão	Tingimento por exaustão	Boa intensidade de cor e potencial para substituição parcial de corantes sintéticos	Yusuf et al. (2021)

<b>Corante</b>	<b>Método de Extração</b>	<b>Substrato</b>	<b>Técnica de Aplicação</b>	<b>Resultado/Conclusão</b>	<b>Referência</b>
Corantes naturais diversos de origem vegetal	Extração aquosa	Algodão	Estudo comparativo com corantes reativos	Menor impacto ambiental dos corantes naturais; desafios de padronização industrial	Islam et al. (2022)
Pau-brasil, pau-de-campeche, quebracho	Extração aquosa a ~90 °C	Algodão	Tingimento com mordentagem metálica	Alta intensidade de cor; melhor uniformidade e solidez em pós-mordentagem; pH do efluente próximo à neutralidade	Mai et al. (2024)
Urucum, açafrão, pau-brasil	Encapsulamento com ciclo dextrinas e extração hidroalcoólica	Algodão, lã, seda	Tingimento com pigmentos encapsulados	$\Delta E^*$ médio $\leq 1,5$ após 5 lavagens; aumento da estabilidade térmica.	Pizzicato et al. (2023)
Urucum, pau-brasil	Modelagem baseada em extração por fervura	Algodão	Análise de ciclo de vida	Redução de até 35% na pegada de carbono frente a corantes reativos.	Zhu et al. (2024)
Urucum e cúrcuma	Tingimento com água reciclada usando extrato previamente filtrado	Algodão	Imersão direta em banho aquoso reaproveitado	Manutenção da intensidade de cor > 90% em relação à água potável.	Shu et al. (2024)
Urucum e cúrcuma	Extração aquosa e alcalina de folhas, raízes e cascas com filtração	Algodão, seda, lã	Aplicação técnica e análise econômica	Viabilidade técnica confirmada; necessidade de padronização industrial.	Gambela (2025)

Fonte: elaborado pela Autora (2025)

Os estudos acadêmicos mais recentes apontam um cenário promissor e em constante evolução para os corantes naturais no setor têxtil. Ainda que haja desafios técnicos, a literatura científica atual converge ao indicar que as inovações em extração, aplicação e sustentabilidade ambiental estão consolidando esses corantes como soluções viáveis, especialmente diante da pressão por processos menos impactantes e por produtos ecologicamente corretos.

### **3 METODOLOGIA**

As atividades experimentais deste estudo foram conduzidas em ambientes laboratoriais e produtivos distintos, de acordo com a natureza de cada etapa. O desenvolvimento das cores, os ensaios em escala laboratorial e a reprodução dos processos em escala produtiva foram realizados na empresa Círculo LTDA, localizada no município de Gaspar, Santa Catarina.

As análises de caracterização, validação e apoio científico foram conduzidas em laboratórios acadêmicos e parceiros, incluindo o Laboratório de Beneficiamento Têxtil (LABENE), o Laboratório Multiusuário de Caracterização Avançada (LMCA) e o Laboratório de Análise Térmica e Espectroscopia (LTE), todos vinculados à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), campus Blumenau.

As análises físico-químicas dos efluentes foram realizadas em laboratório parceiro da empresa Ekonova, localizado em Pomerode/SC, enquanto os ensaios de toxicidade aguda foram conduzidos pelo laboratório acreditado Umwelt Biotechnologia Ambiental, em Blumenau/SC, conforme normas técnicas vigentes.

#### **3.1 MATERIAIS**

Os materiais utilizados no estudo seguem listados no Quadro 5.

Quadro 5 - Materiais do estudo

<b>Material</b>	<b>Função</b>	<b>Fornecedor</b>
Fio 4/2, 100% Algodão retorcido (362,2 torções por metro)	Substrato têxtil	Círculo Ltda
Emussol AC 20 líq	Emulsionante	Fratelli Ricci
Rico Cat B	Cationizante	Fratelli Ricci
Rico Disperse BR	Dispersante	Fratelli Ricci
Hidróxido de sódio (NaOH, 50%)	Base	Fratelli Ricci
Innoclean	Agente de lavagem	Fratelli Ricci
Ácido acético	Ácido	Fratelli Ricci
Vegan Blend	Amaciante	Fratelli Ricci
Corante Natural Viola	Corante natural	Fratelli Ricci
Carbonato de sódio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	Álcali	Manuchar
Goldspence MCF	Sequestrante / Dispersante	Golden
Amarelo Corafix MER (Color index 145)	Corante Reativo	Colourtex
Vermelho Corafix ME4B (Color index 195)	Corante Reativo	Colourtex
Azul Corafix M.SFB (Color index 222)	Corante Reativo	Colourtex
NaCl – Cloreto de sódio	Eletrólito	Refisa
Laucid FB	Ácido	Erca
Lamegal HSB	Sequestrante / Dispersante	Erca
Govegan Soft GCT	Amaciante	Golden Química
Goldpal BSO	Umectante	Golden Química
Goldscm TA	Sequestrante	Golden Química
Goldsoap OK	Sequestrante	Golden Química
GOLDSTAB OX	Estabilizador de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Golden Química
Interox - H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50%	Peróxido de hidrogênio	Blusche e Lepper
Neutralizador de Peróxido	Neutralizante	Ekotex
Ekotex OTM (detergente)	Detergente	Ekotex

Fonte: Autora (2025)

### 3.2 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados no estudo dessa dissertação estão listados no Quadro 6:

Quadro 6 - Equipamentos e *Software*

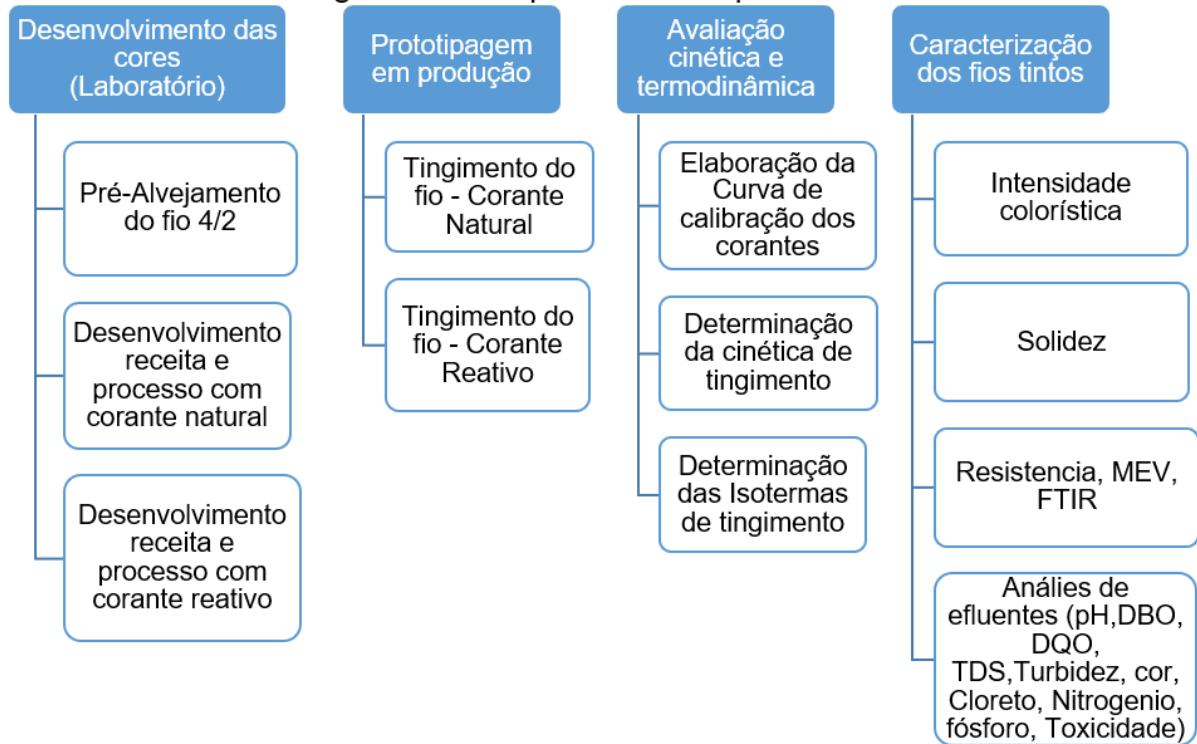
<b>Equipamento/<i>Software</i></b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>
Máquina de tingir	Kimak	ATH-T2
Máquina de tingir	Mathis	WASH-B-0586
Armário de meadas	EMT Brasil	Bertuzzo
Balança analítica	Shimadzu	ATX
Espectrofotômetro de absorvância no ultravioleta–visível (UV-Vis)	BEL Photonics	UV – M51
Espectrofotômetro de reflectância	Datacolor	500
Dinamômetro de tração	Marte	2020
Espectrômetro FTIR (modo ATR)	PerkinElmer	Frontier
Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	JEOL NeoScope	JCM-7000
Espectrofotômetro de absorvância	Hach	Hach DR6000
pHmetro digital	Marte	MB-10
Crockmeter	Interno	Não identificado

Fonte: Autora (2025)

### 3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As etapas de execução do estudo estão organizadas de forma sequencial e são apresentadas no esquema ilustrado na Figura 14. O diagrama sintetiza a lógica metodológica adotada, desde o desenvolvimento das cores em escala laboratorial até a caracterização dos fios tingidos e a avaliação dos efluentes gerados.

Figura 14 – Esquema das etapas do estudo



Fonte: Autora (2025)

A metodologia foi estruturada em etapas interdependentes, permitindo a comparação entre os sistemas tintoriais com corante natural e com corantes reativos, bem como a análise do comportamento desses sistemas em diferentes escalas de aplicação. A descrição detalhada de cada etapa é apresentada nas subseções a seguir, conforme a ordem estabelecida no diagrama.

### 3.3.1 Desenvolvimento de cores

O desenvolvimento das cores foi estruturado em etapas sucessivas, conforme indicado no diagrama metodológico, com o objetivo de estabelecer sistemas tintoriais comparáveis. Inicialmente, foi estabelecida a tonalidade de referência a partir do tingimento com o corante natural tom violeta. Em seguida, foi desenvolvida uma tricromia de corantes reativos buscando uma aproximação cromática em relação a essa tonalidade.

### 3.3.1.1 Pré-Alvejamento dos fios

O pré-alvejamento dos fios de algodão foi realizado conforme receita padrão utilizada na Círculo S.A. para processos de beneficiamento em escala produtiva. O procedimento visou à remoção de impurezas naturais da fibra, óleos, ceras e sujeiras residuais, promovendo maior uniformidade na absorção do corante e favorecendo a penetração das soluções tintoriais nas etapas subsequentes.

A operação foi conduzida em equipamento industrial com agitação e controle térmico, utilizando as seguintes condições de processo:

- HT Armário de meadas
- Relação de banho: 1:7
- Temperatura de processo: 93 °C
- Tempo total de alvejamento: 30 minutos
- Número de enxágues: 3 águas subsequentes

A formulação química aplicada incluiu os seguintes reagentes conforme Quadro 7.

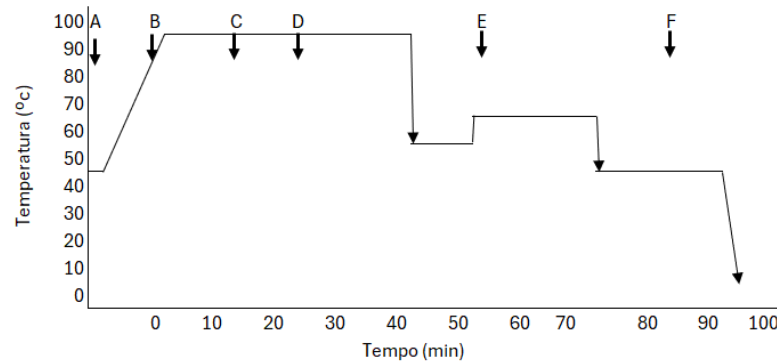
Quadro 7 - Receita de pré-alvejamento

Produto	Sequência	Função	Dosagem
Goldpal BSO	A	Umectante	0,65 g/l
Goldscorn TA	B	Sequestrante	1,3 g/l
Hidróxido de sódio (NaOH, 50%)	C	Agente de saponificação	4,0 g/l
Peróxido de hidrogênio 50%	C	Oxidante	3%
Goldstab Ox	D	Estabilizador PE (Peróxido)	0,5%
Neutralizador rph	E	Neutralizador	0,9%
Laucid FB	F	Ácido	0,6%

Fonte: Autora (2025)

A Figura 15 apresenta o perfil térmico do pré-alvejamento e a sequência de adição dos insumos químicos (A a F), bem como as etapas de aquecimento e enxágue do processo.

Figura 15 - Pré-alveamento



Fonte: Autora (2025)

Durante o processamento, o sistema foi aquecido de forma gradual até a temperatura de 93°C e mantido por 30 min conforme Figura 15. A agitação constante assegurou a homogeneização do banho e a atuação eficaz dos agentes sequestrantes e alcalinos sobre as impurezas do fio. Ao término do alveamento, os fios foram submetidos a três enxágues consecutivos com água, visando remover resíduos químicos e estabilizar o pH do substrato antes do tingimento.

### 3.3.1.2 *Formulação de tingimento e processo com corante natural*

A etapa de definição e desenvolvimento da cor com o corante natural foi conduzida a partir da avaliação de diferentes concentrações de aplicação (1, 2 e 3% em relação à massa do material têxtil), conforme protocolo técnico do fornecedor.

O desenvolvimento da receita de tingimento com o corante natural de tonalidade violeta foi conduzido em escala laboratorial, utilizando-se máquina de tingimento em canecos da marca Kimak ATH-T2, operando em banho a frio. O substrato utilizado foi fio de algodão retorcido, previamente submetido a pré-alveamento por processo convencional. Os tingimentos laboratoriais seguiram as orientações técnicas do fornecedor do corante natural, compreendendo três etapas principais: pré-tratamento (cationização), tingimento e ensaboamento, conforme apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 – Formulação do tingimento com corante natural

Etapa	Reagente / Produto	Concentração	Procedimento
Pré-tratamento (Cationização)	Emussol AC 20 líq	1%	Adicionar e agitar
	Rico Cat B	5%	Dosar e agitar por 15 min
	Hidróxido de sódio (NaOH, 50%)	1,5%	Dosar e agitar por mais 15 min
	2 enxágues com água fria (Total: 50 minutos)		
Tingimento	Emussol AC 20 líq	2%	Adicionar e agitar 5 min
	Rico Disperse BR	2%	Adicionar e agitar 1 min
	Corante tom violeta	1%, 2% ou 3%	Dosar e agitar por 15 min
	Barrilha (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	1%	Adicionar e tingir por 30 min a frio
	2 enxágues com água fria (Total: 70 minutos)		
Ensaboamento	Innoclean	0,5%	Agitar 10 min a frio + enxágue (Total: 15 minutos)
Amaciamento	Vegan Blend	5%	Tratar a frio por 15 min + enxágue (Total: 20 minutos)

**Nota:** As concentrações estão expressas em relação à massa do material têxtil (% o.m.t.), salvo quando indicado de outra forma.

Fonte: Documento técnico do doador de corante (2025)

### 3.3.1.3 Formulação de tingimento e processo com corante reativo

Para a formulação de tingimento com os corantes reativos, foi utilizada a combinação de três corantes da linha Colourtex: vermelho ME4B, amarelo MER e azul

SFB. A composição foi ajustada com base na tonalidade de referência definida a partir do sistema com corante natural. Os testes foram realizados em laboratório com uso da máquina Kimak ATH-T2, com aquecimento e controle de temperatura.

A receita utilizada está descrita no  
Quadro 9.

Quadro 9 – Formulação de tingimento com corante reativo

<b>Etapa</b>	<b>Produto</b>	<b>Concentração</b>	<b>Procedimento</b>	
Tingimento	Goldperse MCF	2 g/L	Adicionar ao banho	
	Goldpal BSO	1 g/L	Adicionar ao banho	
	Vermelho ME4B	0,0890%	Diluir e adicionar ao banho	
	Amarelo MER	0,0294%		
	Azul SFB	0,0586%		
		Sal (NaCl)	15 g/l	Adicionado junto aos corantes
		Aquecer até 60 °C e agitar por 15 min		
	Barrilha (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	7 g/l	Dosagem gradual por 2 min e tingimento por mais 60 min	
Lavação	Ekotex OTM	0,5 g/L	Lavagem quente (85 °C) por 10 min	
	Água	—	Lavagem final a frio por 10 min	

Fonte: Autora (2025)

A barrilha foi utilizada como agente alcalinizante do banho promovendo a alcalinização do meio necessária para ionização parcial da celulose e para a ativação do grupo reativo do corante, favorecendo a formação da ligação covalente entre corante reativo e hidroxilas da fibra.

### 3.4 REPRODUÇÃO EM ESCALA PRODUTIVA

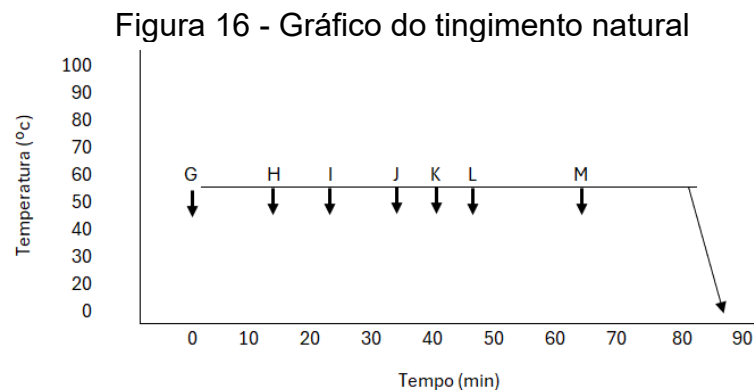
Após o desenvolvimento das receitas em laboratório, os dois sistemas tintoriais – corante natural tom violeta e tricromia de corantes reativos – foram transferidos para escala produtiva, em condições representativas da rotina industrial da empresa parceira. Nesta subseção são descritas as condições de processo adotadas para cada rota, incluindo tipo de máquina, relação banho/substrato, sequência operacional, temperatura, tempo, adição de auxiliares e procedimentos de

lavagem e amaciamento. A apresentação conjunta das condições de produção permite contextualizar os resultados obtidos em termos de aplicabilidade industrial e comparar, em bases equivalentes, o desempenho técnico e o comportamento ambiental dos processos com corante natural e reativo.

### 3.4.1 Tingimento com o corante natural em escala produtiva

O processo de tingimento com o corante violeta foi realizado em escala produtiva utilizando meadas de fio de algodão. A aplicação ocorreu em equipamento do tipo armário modelo Armário Bertuzzo localizado na planta da Círculo LTDA. A receita empregada foi a mesma definida em laboratório, adaptada às condições de produção conforme Figura 16.

O processo foi conduzido com relação de banho e carga de material compatíveis com a rotina industrial do equipamento utilizado.



Fonte: Autora (2025)

O gráfico apresenta a sequência de inserção dos insumos químicos no processo de tingimento com o corante natural tom Violeta, conforme protocolo técnico recomendado pelo fornecedor de corante natural e descrita no Tabela 1.

Tabela 1 - Formulação para o tingimento com o corante natural em escala industrial

Produto	Sequência	Função	Dosagem (%)
Emussol AC 20 líq.	G	Emulsionante	1,0
Rico Cat B	H	Cationizante	5,0
Hidróxido de sódio (NaOH, 50%)	I	Alcalinizante	1,5
Emussol AC 20 líq.	J	Emulsionante	2,0
Rico Disperse BR	K	Dispersante	2,0
Corante tom violeta	L	Corante natural	3,0
Carbonato de sódio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	M	Alcali	1,0

Fonte: Documento técnico do fornecedor de corante (2025)

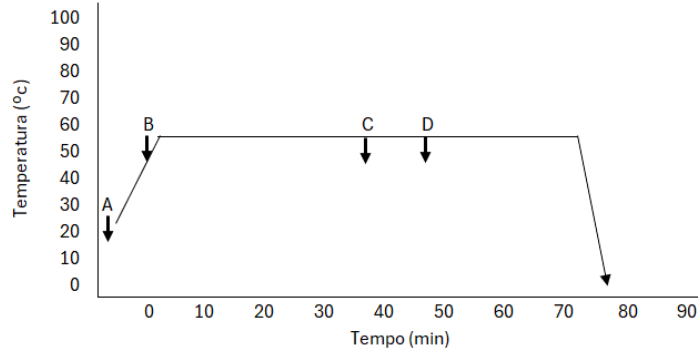
A formulação adotada seguiu protocolo técnico da empresa fornecedora do corante natural, com adaptações para fios de algodão previamente alvejados. O processo inicia com agentes emulsionantes e cationizantes (itens G a I), que promovem maior afinidade entre a fibra celulósica e o corante natural tom violeta. Na sequência, são inseridos dispersantes, o corante e o Carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), elevando o pH do banho e favorecendo a fixação do corante. A aplicação ocorre a frio, com controle de tempo e pH, conforme perfil térmico ilustrado na Figura 16.

### 3.4.2 Tingimento com corante reativo em escala produtiva

O tingimento com a formulação do corante reativo foi executado em equipamento de tingimento do tipo armário, o mesmo equipamento utilizando no tingimento da tricromia natural, com capacidade de 6 kg de fios. Foram utilizadas as mesmas proporções validadas na etapa laboratorial, considerando os ajustes necessários para aplicação em escala produtiva.

Em laboratório foi empregado o processo *all in* e somente a dosagem da Carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) foi realizada 15 minutos após o patamar do corante. Enquanto no processo produtivo o gráfico utilizado e formulação seguiram conforme Figura 17.

Figura 17 - Gráfico de tingimento reativo



Fonte: Autora (2025)

O gráfico da Figura 17 apresenta a sequência de inserção dos insumos químicos no processo de tingimento com corantes reativos sintéticos em tricromia, conforme metodologia desenvolvida para simulação da cor natural e detalhada na Tabela 2.

Tabela 2 - Formulação do tingimento com corante reativo

Produto	Sequência	Função	Dosagem
Goldspence MCF	A	Sequestrante de ferro, e cálcio / Dispersante	2,0 g/L
Amarelo Corafix MER	B	Corante reativo	0,0294 %
Vermelho Corafix ME4B	B	Corante reativo	0,0890 %
Corafix Azul M. SFB	B	Corante reativo	0,0586 %
Sal refinado não iodado	C	Eletrólito (sal comum)	15,0 g/L
Carbonato de sódio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	D	Alcali	7,0 g/L

Fonte: Autora (2025)

A Tabela 2 apresenta a composição da receita empregada para a simulação da cor natural por meio da combinação de três corantes reativos (amarelo, vermelho e azul) em tricromia. O processo segue metodologia já consolidada na indústria têxtil, utilizando eletrólitos (sal) para promover a exaustão do corante e agentes alcalinizantes para ativar os grupos reativos e favorecer a formação de ligações covalentes com a celulose (SHORE, 1995; WARDMAN, 2017).

### 3.4.3 Procedimentos para estudo cinético e de equilíbrio

Esta seção descreve os procedimentos adotados para o estudo cinético e de equilíbrio dos processos de tingimento com corante natural tom violeta e com a tricromia de corantes reativos. Inicialmente, são discutidas as curvas de exaustão e os ajustes aos modelos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO), permitindo estimar as constantes cinéticas, as capacidades de adsorção em função do tempo ( $q_t$ ) e no equilíbrio ( $q_e$ ) e a qualidade de ajuste ( $R^2$ ) para cada sistema. Em seguida, são apresentados os resultados das isotermas de tingimento do corante natural, obtidas em diferentes concentrações de banho e analisadas à luz dos modelos de Nernst, Langmuir e Freundlich, com determinação dos parâmetros de capacidade máxima de adsorção e afinidade. As análises cinéticas e isotérmicas, integradas aos dados colorimétricos de exaustão, fornecem subsídios para compreender os mecanismos de interação entre corante e fibra e comparar o comportamento dos sistemas natural e reativo quanto à eficiência de adsorção e à estabilidade do tingimento.

#### 3.4.3.1 *Elaboração da Curva de calibração dos corantes*

Para a quantificação da concentração de corantes no banho, foram elaboradas curvas de calibração para os dois sistemas tintoriais (natural e reativo). As curvas foram construídas por meio de leituras espectrofotométricas de soluções padrões em diferentes concentrações. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro UV-Vis no Laboratório de Beneficiamento Têxtil (LABENE) da UFSC/Blumenau para obtenção da absorvância, a partir da qual foram calculadas as concentrações (g/L) por meio da Lei de Lambert-Beer.

#### 3.4.3.2 *Procedimento experimental para estudo da cinética de tingimento*

A cinética de exaustão dos corantes, tanto para o tingimento com corante natural quanto para com o corante reativo, foi determinada experimentalmente por meio do monitoramento da concentração de corante remanescente no banho de tingimento, ao longo do tempo.

Para isso, foram realizadas coletas do banho de tingimento no equipamento de laboratório, com coletas de alíquotas a cada 10 minutos e ainda em escala de produção nos tempos de 25, 65, 140 e 155 minutos. As coletas iniciaram-se após a injeção do primeiro auxiliar químico sendo a adição de sal para o processo reativo e agente cationizantes para o processo natural e estenderam-se até o término do processo tintorial.

As alíquotas coletadas tiveram volume padronizado de 30 ml no laboratório e 500 mL em produção e foram analisadas em duplicatas, para garantir a reprodutibilidade e permitir a análise de média e desvio-padrão.

#### 3.4.3.3 *Procedimento de ajuste e modelagem cinética*

A análise cinética do processo de tingimento foi realizada a partir dos dados experimentais de concentração de corante no banho em função do tempo, os quais foram convertidos em quantidade adsorvida por unidade de massa de fibra ( $q_t$ ). Os modelos cinéticos considerados neste trabalho (pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem) e suas respectivas equações foram apresentados previamente na seção de Fundamentação Teórica, de modo que, nesta subseção, são descritos apenas os procedimentos adotados para o ajuste desses modelos aos dados experimentais.

Para cada condição de tingimento, os valores de  $q_t$  obtidos experimentalmente foram ajustados aos modelos escolhidos, estimando-se os parâmetros cinéticos (como as constantes de velocidade aparentes e a capacidade de equilíbrio calculada) por regressão a partir das formas matemáticas apresentadas na fundamentação. A qualidade do ajuste foi avaliada com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), na comparação entre os valores experimentais e calculados de  $q_e$  e na análise gráfica da concordância entre os pontos experimentais e as curvas teóricas.

A partir dessa análise, foi possível identificar qual modelo cinético melhor representa o comportamento de adsorção do corante natural nas condições estudadas, servindo de base para a discussão dos mecanismos predominantes de interação fibra–corante e para a comparação entre as diferentes condições de processo.

#### 3.4.3.4 *Determinação das Isotermas de tingimento*

A modelagem de equilíbrio por meio de isotermas de adsorção foi realizada exclusivamente para o sistema com corante natural, pois o foco deste trabalho é investigar o comportamento de adsorção e a viabilidade de aplicação industrial dessa rota alternativa em algodão. No caso dos corantes reativos, o processo adotado corresponde a uma condição industrial já consolidada, para a qual os mecanismos de adsorção, fixação e hidrólise, bem como o ajuste a modelos cinéticos e de equilíbrio, encontram-se amplamente descritos na literatura (SHORE, 1995; BURKINSHAW, 2016). Em contraste, para corantes naturais, a maior heterogeneidade estrutural e a sensibilidade às condições de processo tornam o comportamento de adsorção fortemente dependente de cada sistema fibra–corante, reforçando a necessidade de determinação específica de isotermas para cada caso estudado (BECHTOLD; TURCZA; GEISSER, 2005; CRISTEA; VILAREM, 2006; VANKAR, 2017). Assim, a opção por desenvolver isotermas apenas para o corante natural concentra o esforço experimental no principal objeto de inovação desta pesquisa, utilizando o processo reativo apenas como referência para comparação.

Para a obtenção da isoterma que melhor se ajusta ao tingimento com corante tom violeta em estudo, foram realizados tingimentos com 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0% e 3,2% de corante em relação à massa do material têxtil, totalizando sete diferentes concentrações. Os banhos foram coletados no início do tingimento e final do tingimento de cada concentração e submetidos a leitura de absorvância no espectrofotômetro UV-VIS. Os banhos de tingimentos foram submetidos as leituras por espectrofotometria UV/Vis. Com os dados das leituras foi possível fazer avaliação da isoterma de tingimento baseado nos modelos de Langmuir e Freundlich, conforme a Equação 9 e Equação 10.

#### **3.4.4 Caracterização dos fios tintos**

Após o estabelecimento das rotas de tingimento em laboratório e em escala produtiva, os fios tingidos com corante natural tom violeta e com a tricromia de corantes reativos foram submetidos a uma etapa abrangente de caracterização, com base nos procedimentos descritos no Capítulo 3. Nesta subseção são apresentados

os resultados colorimétricos (parâmetros K/S e  $\Delta E^*$  em relação ao padrão de referência), os ensaios de solidez à lavagem e à fricção, bem como as propriedades físicas dos fios (título, torção, resistência à tração, alongamento e tenacidade específica). Complementarmente, são discutidas as análises estruturais por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), que permitem avaliar possíveis alterações morfológicas e químicas do substrato decorrentes de cada rota tintorial. A integração desses resultados possibilita comparar o desempenho global dos fios tingidos com corante natural e reativo, tanto do ponto de vista de uso do produto quanto da preservação da integridade do substrato de algodão.

#### 3.4.4.1 *Determinação colorimétrica*

A intensidade colorística das amostras tingidas foi avaliada por meio de espectrofotometria de reflectância, utilizando o equipamento Datacolor 500, com iluminação padrão D65 e observador de 10°. As leituras foram realizadas diretamente nas amostras secas, no espaço de cor CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), com o objetivo de quantificar a tonalidade obtida em cada formulação.

Foram determinados três parâmetros principais: o valor de K/S (intensidade de cor), o desvio total de cor ( $\Delta E^*$ ) e a força colorística relativa. Para fins de comparação, definiu-se como padrão de referência a amostra tingida com corante natural na condição considerada alvo; assim, em todos os cálculos de diferença de cor, o par de coordenadas ( $L^*_1$ ,  $a^*_1$ ,  $b^*_1$ ) corresponde ao padrão de corante natural e ( $L^*_2$ ,  $a^*_2$ ,  $b^*_2$ ) à amostra avaliada.

O cálculo da diferença total de cor  $\Delta E^*$  seguiu o modelo CIE76 ( $\Delta E^*_{ab}$ ) para o espaço CIELAB, dado pela Equação 11:

$$\Delta E^* = \sqrt{\{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2\}} \quad \text{Equação 11}$$

em que  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  são as coordenadas do espaço CIELAB do padrão (1) e da amostra em análise (2), conforme recomendado pela Comissão Internacional de Iluminação – CIE (CIE, 2004).

#### 3.4.4.2 *Avaliação da solidez*

A avaliação da solidez da cor foi realizada no laboratório da empresa Círculo LTDA por meio de ensaios à lavagem e à fricção (seca e úmida), adaptadas para o substrato em formato de fio retorcido, com o objetivo de verificar a resistência do tingimento à remoção por ação mecânica ou por ação de lavagem doméstica.

A solidez à lavagem foi realizada em equipamento HT Kimak ATH-T2, seguindo a norma ABNT NBR ISO 105-C06:2010, mas adaptada para fio retorcido. O ensaio foi realizado em equipamento de laboratório com agitação mecânica controlada, a 40 °C por 30 minutos. O detergente padrão da norma foi substituído por sabão/detergente comercial, mantendo-se as demais condições. Cada amostra tingida foi trançada a um fio-testemunha de algodão 100%, retorcido, alvejado sem branqueador óptico. Após o ensaio, os corpos de prova foram enxaguados, secos e avaliados conforme escala de cinza da norma, determinando a alteração da cor da amostra e a transferência de cor para o fio testemunha.

A solidez da cor à fricção, em seco e úmido, foi avaliada conforme ABNT NBR ISO 105-X12:2019, utilizando aparelho tipo Crockmeter. Para cada amostra, retirou-se uma meada de aproximadamente 3 g de fio tingido e prepararam-se dois corpos-de-prova de tecido plano (popeline alvejada), em quadrados de 50 × 50 mm. No ensaio a seco, o tecido foi fixado no dispositivo e friccionado sobre os fios por 10 ciclos de vai-e-vem; no ensaio a úmido, um segundo tecido foi umedecido, levemente espremido e friccionado nas mesmas condições. Após secagem em temperatura ambiente, a transferência de cor para os tecidos foi classificada por comparação com a escala cinza para manchamento, registrando-se as notas no formulário de solidez. Para a avaliação de solidez a fricção a seco, o fio-testemunha, 100% algodão, foi aplicado a seco sobre a amostra.

Em ambos os casos, após o ensaio, foi determinada a intensidade do manchamento no fio-testemunha e a alteração da cor da amostra tingida, com base na escala de cinza de avaliação da solidez.

#### 3.4.4.3 *Determinação da Resistência mecânica dos fios*

A resistência mecânica dos fios foi avaliada por ensaio de tração, tomando como referência as normas ASTM D2256 e ABNT NBR ISO 2062. Os ensaios foram

realizados no laboratório da empresa parceira, em dinamômetro Marte, modelo 2020, equipado com célula de carga de 3.200 g previamente calibrada, utilizando segmentos individuais de fio, com velocidade de ensaio de 600 mm/min (1 cm/s), até a ruptura.

Foram registrados, para cada corpo de prova, os valores de carga máxima de ruptura (N), alongamento na ruptura (%) e tenacidade ( $g_f/tex$ , equivalente a RKM). A tenacidade em RKM foi obtida a partir da razão entre a carga máxima de ruptura, expressa em grama-força ( $g_f$ ), e o título em tex, considerando-se  $1 g_f \approx 0,981 cN$ . Para cada condição experimental foram realizados, no mínimo, 10 ensaios, calculando-se média e desvio padrão.

A comparação entre os resultados obtidos para fios antes e depois do tingimento permitiu avaliar o efeito dos processos com corante natural e corante reativo sobre a integridade mecânica do substrato.

#### 3.4.4.4 *Microscopia eletrônica de varredura*

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica eficaz para a avaliação morfológica da superfície de substratos têxteis antes e após processos de modificação, como o tingimento. Por meio da obtenção de micrografias com ampliação elevada, torna-se possível analisar alterações na topografia das fibras, presença de resíduos, depósitos ou aglomerações superficiais que indicam a adesão de materiais externos (PAUL; GENESCA, 2013; SILVA et al., 2023).

Neste trabalho, a MEV foi utilizada para investigar a superfície dos fios de algodão 100%, em diferentes estágios do processo tintorial com o corante natural tom violeta. As análises permitiram verificar se o corante apresenta deposição superficial, penetração entre as micro fibrilas ou formação de cristais/agregados, o que pode indicar o tipo de interação predominante entre corante e substrato.

As análises foram conduzidas no Laboratório Multiusuário de Caracterização Avançada (LMCA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Blumenau/SC. Foram avaliadas amostras de algodão, fio retorcido, fio alvejado, fio cationizado e tinto nas duas condições sendo tricromia reativo e com corante natural, permitindo comparar as superfícies antes e depois dos processos. Os resultados fornecem subsídios para confirmar a eficácia da fixação e auxiliar na compreensão da uniformidade da cobertura tintorial.

As análises de MEV foram realizadas em JEOL NeoScope JCM-7000, operando a 15 kV. As amostras foram secas, fixadas em suporte condutor (stub) e submetidas à metalização com ouro (sputter coat) para evitar carga. As imagens foram obtidas em ampliações variando entre 500x e 2000x, permitindo avaliar rugosidade superficial, deposição de corante e possíveis alterações da cutícula e fibrilas.

#### 3.4.4.5 *Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier*

A FTIR é uma técnica analítica que permite identificar grupos funcionais em materiais por meio das vibrações moleculares geradas pela interação entre as ligações químicas e a radiação eletromagnética (PAUL; GENESCA, 2013; RAMLOW, 2018). Trata-se de um método amplamente empregado na caracterização de substratos celulósicos, especialmente quando submetidos a modificações químicas ou à aplicação de compostos orgânicos, como os corantes naturais.

Neste estudo, a técnica foi utilizada para identificar e comparar os grupos funcionais presentes nas fibras de algodão 100% em diferentes etapas do processo, cru, alvejado, cationizado e tingido, com o objetivo de verificar as modificações químicas promovidas pelos tratamentos e a possível incorporação do corante natural tom violeta.

As análises foram realizadas no Laboratório de Análise Térmica e Espectroscopia (LTE) da UFSC Blumenau, utilizando o método por transmitância e varredura em números de onda entre 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$  em equipamento Perkin Elmer Frontier.

A análise foi realizada para as amostras purgadas, cationizadas e tingidas, a fim de verificar alterações no espectro que evidencie o aparecimento de funções orgânicas específicas, bem como inferir interações físico-químicas e/ou ligações químicas entre corante e celulose. Essas variações servem como indicativo das interações físico-químicas ou químicas estabelecidas entre o corante e a fibra, sendo os deslocamentos e mudanças de absorvância evidências diretas da fixação do corante à matriz celulósica (SILVA et al., 2023).

### 3.4.5 Caracterização dos efluentes gerados

A caracterização físico-química dos efluentes foi realizada a partir de amostras de banhos residuais gerados nas etapas de preparação, tingimento, lavações e amaciamento dos processos com corante natural e corante reativo, bem como de amostras representativas da ETE/ETA (amostras A–E, correspondentes aos efluentes do alvejamento, cationização, tingimento e lavações).

As determinações analíticas foram conduzidas por meio de procedimentos internos do laboratório parceiro, codificados como PLAA-005, PLAA-006, PLAA-018, PLAA-023, PLAA-009, PLAA-007, PLAA-002, PLAA-004, PLAA-016 e PLAA-013, todos baseados nos métodos descritos na norma *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24<sup>a</sup> edição (APHA et al., 2023), conforme indicado nos relatórios técnicos da ETE/ETA e dos efluentes de processo. A avaliação da toxicidade aguda dos efluentes foi realizada por meio de ensaios com o microcrustáceo *Daphnia magna*, conduzidos pelo laboratório Umwelt Biotecnologia Ambiental (Blumenau, SC), a partir de amostras de efluente de processo com corante reativo, com corante natural e de efluente de tingimento natural em escala industrial. Os ensaios seguiram a norma ABNT NBR 12713:2022, com determinação do fator tóxico (FT) e da concentração efetiva média (CE50) para cada amostra, conforme apresentado nos relatórios de análises 12454/2025.0.A, 12455/2025.0.A e 17517/2025.0.A emitidos pelo laboratório acreditado.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados referentes à quantificação dos corantes, ao comportamento cinético dos sistemas tintoriais reativo e natural, à caracterização colorimétrica, às propriedades físico-mecânicas das amostras, às análises por FTIR, às avaliações por MEV e à caracterização dos efluentes. A organização dos tópicos foi estruturada de forma a construir uma narrativa integrada, iniciando pela dinâmica de interação corante–fibra no banho de tingimento e avançando para os desdobramentos desse comportamento sobre a solidez, a cor, a integridade do substrato e os impactos ambientais associados ao processo.

### 4.1 AVALIAÇÃO COLORIMÉTRICA DOS FIOS

#### 4.1.1 Reprodutibilidade do corante natural em laboratório

Os ensaios com o corante natural tom violeta apresentaram variação perceptível de tonalidade entre as amostras avaliadas. Essa dispersão está apresentada na Tabela 3, que reúne os valores de K/S, força colorística relativa e  $\Delta E^*$  das formulações avaliadas.

Tabela 3 - Resultados Tingimento corante natural

<b>Amostra</b>	<b>K/S</b>	<b>Força Relativa (%)</b>	<b><math>\Delta E^*</math></b>	<b>Observações</b>
Padrão	1,73	100	-	Padrão de referência
A1	1,56	90,17	1,57	$\Delta E^*$ acima da faixa de aceitação, intensidade inferior
A2	1,6	92,49	1,46	$\Delta E^*$ muito próximo ao padrão
A3	1,61	93,06	1,62	$\Delta E^*$ acima da faixa de aceitação
A4	2,1	121,39	3,85	$\Delta E^*$ acima da faixa de aceitação, desvio perceptível
A5	2,69	155,49	5,89	$\Delta E^*$ acima da faixa de aceitação Maior desvio de tonalidade

Fonte: Autora (2025)

Diante dessa variabilidade, foi necessário estabelecer um padrão de referência para o sistema natural, que servisse como alvo tanto para a etapa comparativa em laboratório quanto para o desenvolvimento das receitas em escala produtiva. A amostra escolhida como padrão foi aquela que apresentou melhor igualização visual (tonalidade homogênea, sem manchas) e intensidade intermediária ( $K/S \approx 1,73$ ), posicionada no centro da faixa de resultados obtidos. A Figura 18 ilustra visualmente essa amostra de referência.

Figura 18 - Amostra Padrão Viola 3%



Fonte: Autora (2025)

As demais amostras, denominadas A1 a A5, evidenciam a amplitude da variação gerada em laboratório: o  $K/S$  variou de 1,56 a 2,69 e o  $\Delta E^*$  em relação ao padrão oscilou entre 1,46 e 5,89. As formulações A1, A2 e A3 apresentaram tonalidades levemente mais claras que o padrão ( $K/S$  ligeiramente inferior) e  $\Delta E^*$  em torno de 1,5–1,6, enquanto A4 e A5 exibiram intensidades muito superiores ( $K/S \geq 2,1$ ) e grandes desvios de tonalidade, claramente perceptíveis.

Para a definição da tonalidade de referência utilizada neste estudo, foi adotado o padrão Pantone® 15-3508, correspondente ao tom violeta selecionado para o desenvolvimento das formulações tintoriais, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Padrão de referência da tonalidade violeta (Pantone® 15-3508)



Fonte: Pantone (2013)

#### 4.1.2 Corante reativo (tricromia)

Com o padrão natural definido ( $K/S = 1,73$ ), foi então desenvolvida, em laboratório, uma receita de tricromia com corantes reativos com o objetivo de aproximar a cor reativa da cor obtida com o corante natural. A Tabela 4 apresenta os dados colorimétricos das duas formulações avaliadas.

Tabela 4 - Dados colorimétricos da tricromia com corantes reativos (base: tonalidade violeta 3%)

Amostra	K/S	Força Relativa (%)	$\Delta E^*$	Observações
Padrão (natural)	1,73	100	—	Padrão de referência
Tricromia 1	0,8845	76,42	2,87	Fora de alvo; baixa intensidade
Tricromia 2	0,9831	86,24	1,48	$\Delta E^*$ aceitável; proposta para produção

Fonte: Autora (2025)

A Tricromia 1 resultou em menor intensidade colorística ( $K/S = 0,8845$ ; força relativa de 76,42%) e  $\Delta E^* = 2,87$  em relação ao padrão natural, configurando cor visivelmente mais clara e fora do alvo desejado. A partir desse resultado, a receita foi ajustada, originando a Tricromia 2, que apresentou  $K/S = 0,9831$ , força relativa de 86,24% e  $\Delta E^* = 1,48$  em relação ao padrão natural. Esse valor de  $\Delta E^*$  está dentro da faixa de aceitação utilizada pela empresa ( $\Delta E^* \leq 1,5$ ), motivo pelo qual a Tricromia 2 foi selecionada como receita de referência para o sistema reativo e está apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Tricromia reativa



Fonte: Autora (2025)

#### 4.1.3 Avaliação de cor em escala produtiva

Na etapa produtiva, as receitas definidas em laboratório para o corante natural e para a tricromia de corantes reativos foram aplicadas em escala industrial. As medições colorimétricas dos lotes tintos em produção foram realizadas em espectrofotômetro por reflectância, sob iluminante D65 e observador de 10°, calculando-se as diferenças de cor em relação aos respectivos padrões laboratoriais no sistema CIELAB ( $\Delta E^*_{ab}$  e  $\Delta E$  CMC (2:1)).

A Tabela 5 sintetiza os resultados obtidos para cada sistema tintorial.

Tabela 5 – Avaliação de cor via espectrofotometria

Sistema tintorial	Situação comparada	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^*_{ab}$	$\Delta E$ CMC (2:1)	Julgamento do software
Reativo	Lote tinto em produção × padrão reativo de laboratório	1,45	0,27	-0,24	1,5	0,65	Passa
Natural	Lote tinto em produção × padrão natural de laboratório	-0,91	2,35	2,15	3,31	2,99	Falha

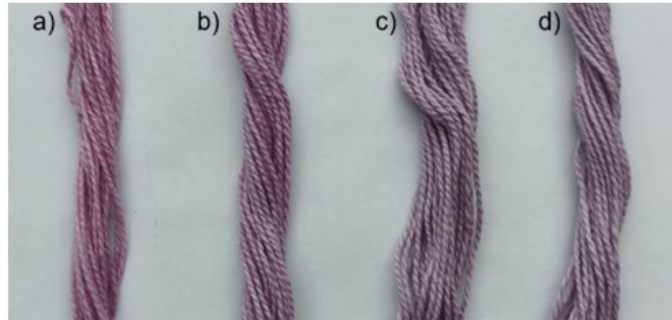
Fonte: Autora (2025)

Observa-se que o lote tinto em produção com tricromia reativa apresentou diferença de cor relativamente baixa em relação ao padrão de laboratório ( $\Delta E^*_{ab} = 1,50$ ), sendo classificado pelo critério CMC como “Passa”. Essa diferença está associada a um leve aumento de luminosidade e pequenas variações nos eixos  $a^*$  e  $b^*$ , indicando que, dentro da tolerância industrial estabelecida, a receita reativa mostrou-se robusta na transposição da escala laboratorial para a escala produtiva.

Para o corante natural, por sua vez, a diferença de cor entre o lote tinto em produção e o padrão laboratorial foi significativamente maior ( $\Delta E^*_{ab} = 3,31$ ), ultrapassando o limite aceito pelo critério CMC e sendo classificada como “Falha”. O lote em produção resultou mais escuro, mais vermelho e mais amarelo que o padrão, evidenciando a maior sensibilidade desse sistema às variações de processo e a dificuldade de reproduzir fielmente a tonalidade-alvo em escala industrial.

A Figura 21 ilustra a comparação visual entre os fios produzidos com corante natural e com a tricromia reativa em produção. A Figura 21 ilustra nas subfiguras b e c, respectivamente, o padrão natural e o padrão reativo obtidos em laboratório, ao passo que as subfiguras a e d correspondem aos lotes tintos em produção com corante natural e com tricromia reativa.

Figura 21 – Amostra tinta em produção – natural (a e b) x reativo (c e d)



Fonte: Autora (2025)

Nota-se que o lote reativo em produção se mantém próximo do padrão definido para o seu próprio sistema, enquanto o lote natural se afasta de forma perceptível do alvo laboratorial. Observa-se que o lote reativo em produção (d) se aproxima cromaticamente do padrão reativo (c), em concordância com os baixos valores de  $\Delta E$  apresentados no Quadro 12. Em contraste, o lote produzido com corante natural (a) apresenta diferença visual evidente em relação ao padrão natural (b), confirmando, de forma instrumental e visual, que o principal desafio identificado neste estudo reside na reprodutibilidade da cor na rota com corante natural, e não na capacidade da tricromia reativa de acompanhar o alvo para o qual foi projetada.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO E CINÉTICA DE TINGIMENTO DOS CORANTES

A quantificação dos corantes ao longo dos ensaios cinéticos exige curvas de calibração confiáveis, construídas de forma independente para cada sistema tintorial. A precisão dessas curvas é essencial, pois determina a confiabilidade da conversão das leituras espectrofotométricas (absorbância) em concentração (mg/L), etapa fundamental para o cálculo da exaustão e da quantidade adsorvida por massa de fibra (qt).

#### 4.2.1 Curva de calibração dos corantes

As curvas de calibração dos corantes foram determinadas por espectrofotometria em solução aquosa e são apresentadas no Apêndice A. Neste item são descritas apenas as condições empregadas e os principais parâmetros de ajuste.

Para o corante reativo (tricromia), as leituras espectrofotométricas foram realizadas em 546 nm, e soluções padrão foram preparadas na faixa de 5,3 a 53,06 mg/L. A curva de calibração correspondente encontra-se apresentada no Apêndice A (Figura A.1).

A equação da reta foi obtida por regressão linear a partir dos pares concentração–absorbância, resultando em coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9996$ . Esse valor indica excelente correlação entre os valores medidos e a reta de calibração, garantindo que a conversão de absorbância em concentração para o sistema reativo seja altamente confiável ao longo dos ensaios cinéticos.

Para o corante natural tom violeta, a leitura foi realizada em 525 nm, faixa correspondente ao pico máximo de absorbância da formulação aquosa. As soluções padrão foram preparadas entre 50 e 1000 mg/L. A respectiva curva de calibração é apresentada no Apêndice A (Figura A.2).

A equação da reta foi obtida por regressão linear, com coeficiente de determinação  $R^2 \approx 0,9898$ , indicando linearidade adequada na faixa de trabalho selecionada e obediência robusta à Lei de Lambert–Beer. Essa correlação elevada assegura que pequenas variações de absorbância correspondam a alterações reais de concentração, permitindo acompanhar com precisão a evolução do tingimento ao longo dos ensaios com o corante natural.

#### 4.2.2 Cinética de tingimento

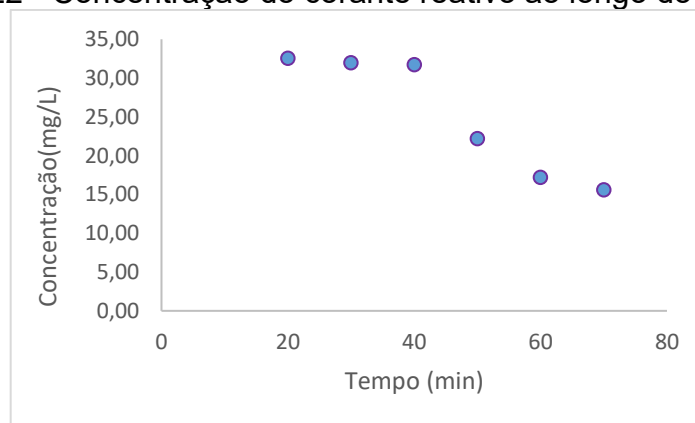
A cinética de tingimento foi avaliada a partir da variação da concentração de corante no banho ao longo do tempo, com coletas realizadas em intervalos definidos durante os processos de tingimento em laboratório e em escala produtiva. As concentrações obtidas por meio das curvas de calibração específicas de cada sistema tintorial foram convertidas em exaustão (%) e em quantidade adsorvida por unidade

de massa de fibra (qt,  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), possibilitando a análise do comportamento dinâmico de cada corante no meio aquoso e sua interação com o substrato.

#### 4.2.2.1 Cinética de tingimento com corantes reativos (*Tricromia*)

As concentrações de corante no banho foram determinadas a partir da curva de calibração descrita no item 5.2.1, e os resultados são apresentados na Figura 22. Os dados cinéticos indicaram que a exaustão do corante reativo ocorreu de forma gradual nos primeiros minutos, intensificando-se após as etapas iniciais do processo e aproximando-se de um comportamento de equilíbrio a partir de 70 minutos. Observa-se a redução progressiva da concentração de corante em solução ao longo do tempo, evidenciando a transferência do corante do banho para a fibra.

Figura 22 - Concentração do corante reativo ao longo do tingimento



Fonte: Autora (2025)

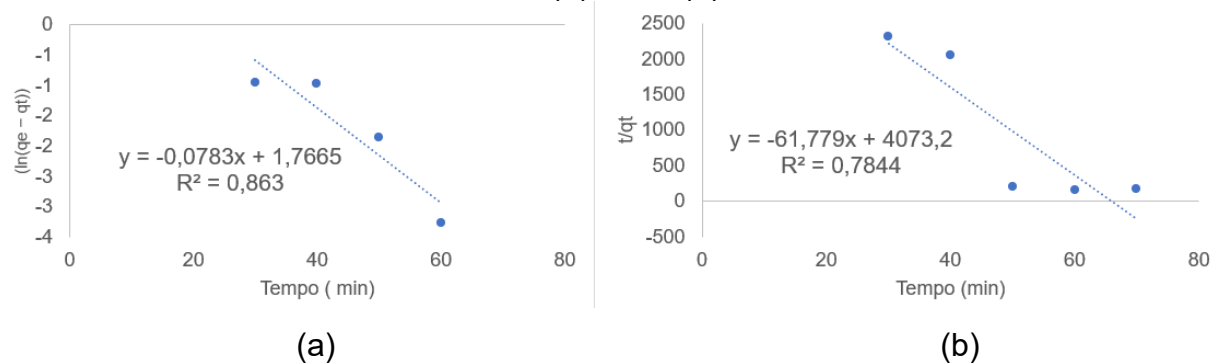
A partir desses valores, foi possível determinar a exaustão final do banho aos 70 minutos. Considerando-se a concentração inicial medida ( $C_0 = 32,54 \text{ mg/L}$ ) e a concentração final no término do processo ( $C_{\text{final}} = 15,61 \text{ mg/L}$ ), a exaustão foi calculada conforme a Equação  $E(\%) = ((C_0 - C_e)/C_0) \times 100$ , resultando em  $E = 51,59\%$ . Esse valor indica que cerca de metade do corante disponível no banho foi efetivamente transferido para a fibra ao longo do processo. Apesar de moderada, esta exaustão é coerente com tingimentos realizados com baixa aplicação de sal ou álcali específicos desta etapa, refletindo tanto a difusão inicial quanto os efeitos de hidrólise parcial do corante.

A quantidade adsorvida por unidade de massa de fibra ( $qt$ ) foi calculada a partir das concentrações determinadas ao longo do processo e aplicada aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO), com o objetivo de identificar qual modelo descreve com maior precisão o comportamento cinético do corante reativo.

A apresenta os ajustes dos dados experimentais aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO).

apresenta os ajustes dos dados experimentais aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO).

Figura 23 - Ajustes experimentais aos modelos cinéticos de adsorção do corante reativo: (a) PFO; (b) PSO.



Fonte: Autora (2025)

Observa-se que o modelo de pseudo-primeira ordem (PFO), proposto por Lagergren, apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,863$ , quando comparado ao modelo de pseudo-segunda ordem (PSO), cujo coeficiente foi  $R^2 = 0,7844$ . Embora a literatura frequentemente associe o tingimento com corantes reativos a mecanismos governados por quimissorção, descritos pelo modelo de pseudo-segunda ordem (HO; MCKAY, 1999; SHORE, 1995; WARDMAN, 2017), os resultados obtidos neste estudo indicam que, nas condições avaliadas, esse comportamento não foi dominante.

O melhor ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem sugere que a etapa limitante da velocidade do processo foi controlada predominantemente por fenômenos de difusão do corante até a superfície da fibra ou por difusão intrapartícula nos estágios iniciais do tingimento. A elevada relação de banho e a baixa concentração

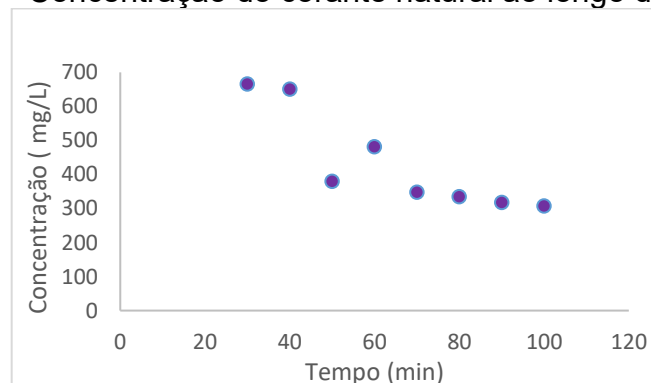
total de corante empregada favoreceram um sistema diluído, no qual a taxa de esgotamento foi fortemente dependente da concentração residual do corante no banho, característica típica de sistemas descritos por cinética de primeira ordem. Além disso, a ausência de condições fortemente alcalinas ao longo de todo o processo pode ter limitado a extensão da reação covalente, contribuindo para o comportamento cinético observado.

O ajuste inferior obtido para o modelo de pseudo-segunda ordem reforça que, embora o mecanismo de fixação dos corantes reativos envolva ligações químicas com a celulose, o processo global de tingimento, nas condições estudadas, apresentou comportamento cinético complexo, no qual etapas de transporte de massa e disponibilidade superficial exerceram papel predominante. Esses resultados evidenciam que a cinética do tingimento reativo não deve ser interpretada exclusivamente sob a ótica da quimissorção, especialmente em sistemas industriais diluídos e de baixa dosagem de corante.

#### 4.2.2.2 *Cinética de tingimento com o corante natural*

O sistema de tingimento com o corante natural, utilizando pré-tratamento de cationização com RicoCat B, apresentou um comportamento de exaustão instável, com variações acentuadas na concentração de corante no banho ao longo do tempo. Observou-se um aumento inicial pronunciado da concentração em solução, atingindo o valor máximo aos 30 minutos, seguido por redução e novas oscilações, indicando a ocorrência de dessorção e redistribuição do corante no meio líquido. A evolução da concentração do corante no banho ao longo do tingimento é apresentada na Figura 24.

Figura 24 - Concentração do corante natural ao longo do tingimento



Fonte: Autora (2025)

A partir desses dados, foi possível estimar a exaustão final do banho aos 100 minutos. Considerando-se como concentração inicial efetivamente disponível no sistema o valor máximo observado experimentalmente ( $C_0 = 665,37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) e a concentração residual ao final do processo ( $C_{\text{final}} = 307,09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), obteve-se exaustão de  $E = 53,85\%$ . Esse valor indica que pouco mais da metade do corante presente no banho foi transferida para a fibra ao longo do processo.

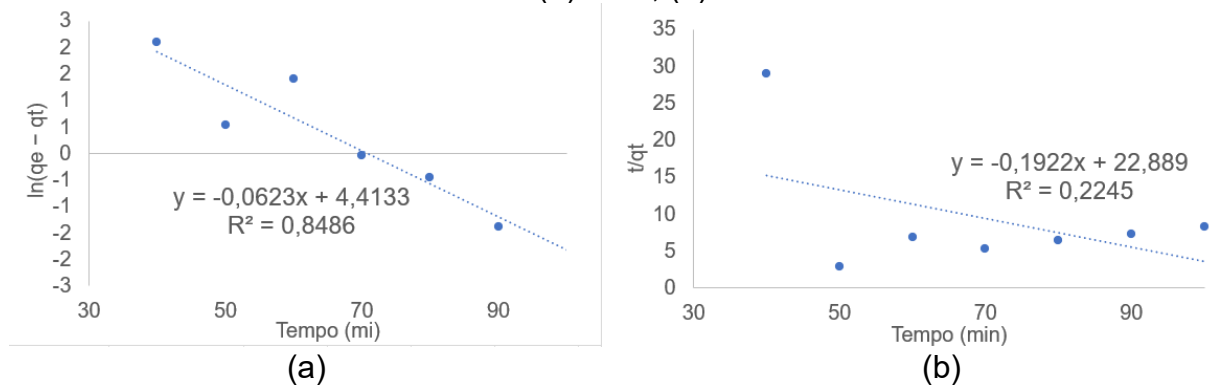
Entretanto, diferentemente do comportamento progressivo observado para o sistema reativo, a cinética do corante natural evidenciou forte instabilidade, com oscilações entre aumento e redução da concentração ao longo do tempo. Esse comportamento sugere que o sistema é governado por um equilíbrio dinâmico entre adsorção e dessorção, refletindo a baixa afinidade do corante natural pela fibra de algodão, mesmo após a modificação catiônica do substrato.

Do ponto de vista físico-químico, essa resposta é coerente com a natureza do corante natural, cuja interação com a fibra ocorre predominantemente por forças eletrostáticas e interações fracas de superfície, sem formação de ligações químicas estáveis. Assim, a exaustão observada representa não apenas a transferência líquida do corante para a fibra, mas o balanço contínuo entre retenção superficial e redistribuição no banho.

A quantidade adsorvida por unidade de massa de fibra ( $q_t$ ) foi calculada a partir das concentrações determinadas ao longo do processo, possibilitando a aplicação dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO). Esses modelos são amplamente utilizados para descrever sistemas de adsorção em fase líquida; entretanto, sua aplicação pressupõe comportamento monotônico da adsorção, condição que não foi plenamente atendida neste sistema.

A Figura 25 apresenta os ajustes dos dados experimentais aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem (PFO) e pseudo-segunda ordem (PSO), obtidos a partir das respectivas formas linearizadas.

Figura 25 - Ajustes experimentais aos modelos cinéticos de adsorção do corante natural: (a) PFO; (b) PSO.



Fonte: Autora (2025)

Os resultados indicaram que nenhum dos modelos cinéticos clássicos forneceu ajuste plenamente satisfatório aos dados experimentais do corante natural. Para o modelo de pseudo-primeira ordem (PFO), o coeficiente de determinação foi moderado ( $R^2 = 0,8486$ ), com desvios relevantes e ausência de linearidade consistente. As oscilações acentuadas na concentração do corante no banho, especialmente entre 30 e 60 minutos, inviabilizam a premissa fundamental do modelo, segundo a qual a diferença entre  $q_e$  e  $q_t$  deve decrescer de forma contínua ao longo do tempo.

O modelo de pseudo-segunda ordem (PSO) apresentou desempenho ainda mais insatisfatório, com coeficiente de determinação muito baixo ( $R^2 = 0,2245$ ), demonstrando que o comportamento do sistema não é governado por quimissorção. Os valores de  $t/q_t$  exibiram elevada dispersão e ausência de tendência linear, indicando que a adsorção do corante natural ocorre de forma fraca, reversível e predominantemente superficial, com ocorrência significativa de dessorção ao longo do processo.

De forma geral, a avaliação cinética do sistema com corante natural revelou comportamento altamente instável e incompatível com os modelos cinéticos tradicionais de primeira e segunda ordem. Essa instabilidade é coerente com a natureza físico-química do corante natural e com o tipo de interação estabelecida com a fibra de algodão cationizada, caracterizada por forças eletrostáticas e interações de baixa energia, sem formação de ligações químicas permanentes.

Além disso, o comportamento observado é conceitualmente compatível com os pressupostos do modelo de Temkin, o qual considera que o calor de adsorção

diminui linearmente com o aumento da cobertura dos sítios ativos, em função da heterogeneidade energética da superfície e das interações adsorvato–adsorvato. A ocorrência de dessorção, a ausência de aproximação clara ao equilíbrio e a dependência da adsorção em sítios de baixa energia indicam que o processo não segue um mecanismo ideal de monocamada, mas sim um regime físico-químico complexo, no qual a energia de interação decresce à medida que a superfície da fibra se torna progressivamente ocupada, conforme descrito por Temkin (CLARK, 2011; VANKAR, 2017).

#### **4.2.3 Comparação entre cinéticas de tingimento: reativo versus natural**

A comparação entre os dois sistemas evidencia comportamentos cinéticos claramente distintos. Para o corante reativo, a curva de exaustão apresentou aumento rápido da quantidade adsorvida nas etapas iniciais, seguido de aproximação gradual ao pseudo-equilíbrio, sem oscilações significativas da concentração de corante no banho. Esse perfil, aliado ao melhor ajuste do modelo de pseudo-primeira ordem (PFO), com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,863$ , superior ao obtido para o modelo de pseudo-segunda ordem (PSO,  $R^2 = 0,7844$ ), indica que, nas condições estudadas, a velocidade de tingimento do corante reativo foi governada predominantemente por etapas de difusão física e pela dependência da taxa de esgotamento em relação à concentração residual do corante no banho, e não por um controle direto por quimissorção em sítios específicos da fibra.

Em contraste, o sistema de tingimento com corante natural apresentou forte instabilidade cinética, caracterizada por sucessivos aumentos e reduções na concentração residual de corante no banho ao longo do tempo. O ajuste ao modelo de pseudo-primeira ordem foi apenas moderado ( $R^2 = 0,8486$ ), enquanto o ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem foi muito fraco ( $R^2 = 0,2245$ ), evidenciando que nenhum dos modelos descreve de forma adequada o comportamento observado. Esses resultados, combinados com a exaustão relativamente baixa e reversível do corante natural, reforçam que sua interação com a fibra é essencialmente fraca, multietapa e dominada por adsorção superficial instável, com ocorrência significativa de dessorção.

Do ponto de vista comparativo, enquanto o sistema reativo apresenta cinética mais regular e previsível, razoavelmente descrita por um modelo de pseudo-primeira

ordem, o sistema natural mostra-se altamente sensível a pequenas variações de processo e incompatível com modelos cinéticos clássicos. Esse comportamento é coerente com um regime de adsorção em superfície energeticamente heterogênea, no qual a energia de interação diminui com o aumento da cobertura, conforme descrito conceitualmente pelo modelo de Temkin. Essa diferença cinética se reflete diretamente na maior variabilidade de cor e na dificuldade de reprodução industrial do tingimento com corante natural.

#### **4.2.4 Resultados Avaliação das isothermas de tingimento**

A etapa termodinâmica do tingimento foi avaliada por meio da construção de isothermas de adsorção exclusivamente para o corante natural tom violeta. Essa escolha fundamenta-se no fato de que, para corantes reativos, os mecanismos de esgotamento e fixação são amplamente consolidados na literatura e estão associados predominantemente à formação de ligações covalentes com a celulose, na presença de eletrólitos e álcali. Nesses sistemas, a retenção do corante não resulta de um equilíbrio físico-químico reversível na interface fibra/banho, mas de uma reação química predominantemente irreversível, o que torna a aplicação de modelos isotérmicos clássicos pouco informativa (CLARK, 2011; HAUSER, 2011; WARDMAN, 2017).

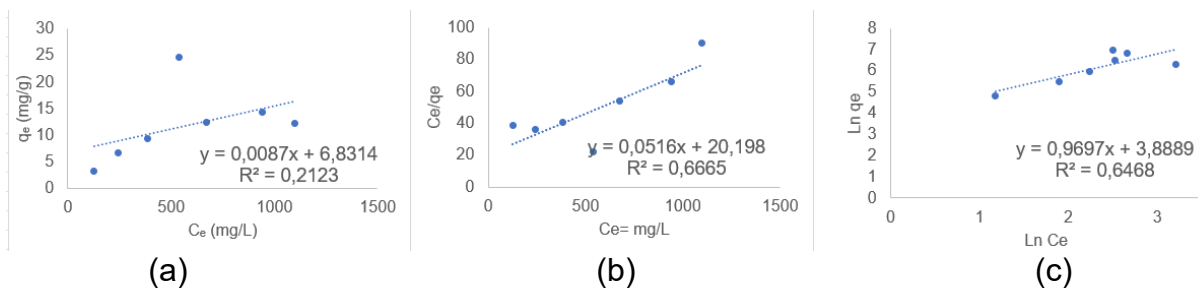
Em contraste, os corantes naturais apresentam interações fracas, multissítio e altamente dependentes da afinidade físico-química entre o corante e o substrato, exigindo avaliação termodinâmica baseada em modelos de adsorção. A literatura aponta que sistemas envolvendo corantes vegetais ou extraídos de biomassa tendem a ajustar-se melhor a modelos empíricos, como Freundlich e Temkin, em razão da heterogeneidade estrutural das fibras modificadas e da ausência de grupos reativos capazes de promover fixação covalente estável (CLARK, 2011; ZANONI; YAMANAKA, 2016; VANKAR, 2017).

Dessa forma, foram construídas isothermas de adsorção para o corante natural tom violeta, utilizando concentrações nominais variando de 0,5% a 3,2% spm. Para cada ensaio, foram coletadas amostras do banho inicial e do banho em equilíbrio. As leituras espectrofotométricas foram convertidas em concentração por meio da curva de calibração específica do sistema (fator 812,42), permitindo o cálculo das

concentrações iniciais ( $C_0$ ), das concentrações de equilíbrio ( $C_e$ ) e da quantidade adsorvida por unidade de massa de fibra ( $q_e$ ).

A Figura 26, apresenta, de forma conjunta, a isoterma experimental de adsorção e os ajustes aos modelos de Nernst, Langmuir e Freundlich.

Figura 26 - Isothermas de adsorção do corante natural tom violeta: (a) isoterma experimental com ajuste ao modelo de Nernst; (b) ajuste ao modelo de Langmuir; (c) ajuste ao modelo de Freundlich.



Fonte: Autora (2025)

O baixo ajuste ao modelo de Nernst confirma que o sistema não se comporta como um processo de partição ideal, reforçando a heterogeneidade dos sítios de adsorção e a ausência de afinidade média elevada entre o corante natural e a fibra cationizada. No gráfico 26 (a), os pontos experimentais de equilíbrio ( $q_e \times C_e$ ) são apresentados juntamente com a reta ajustada ao modelo de Nernst. Observa-se uma tendência geral de aumento de  $q_e$  com  $C_e$ , porém com elevada dispersão dos pontos experimentais. O baixo coeficiente de determinação obtido para esse ajuste indica que o modelo de partição ideal não descreve adequadamente o sistema, evidenciando baixa afinidade média e forte heterogeneidade dos sítios de adsorção da fibra cationizada, em concordância com as discussões de Clark (2011) e Hauser (2011).

O gráfico 26 (b) apresenta o ajuste ao modelo de Langmuir na forma linearizada. Embora o coeficiente de determinação seja superior ao observado para o modelo de Nernst, o ajuste ainda é apenas moderado e não há indicação clara de aproximação à saturação dos sítios de adsorção. A baixa constante de afinidade obtida ( $K$ ) indica interação fraca entre o corante natural e a fibra, sugerindo que a hipótese de superfície homogênea com formação de monocamada é apenas parcialmente válida para o sistema avaliado (CLARK, 2011; WARDMAN, 2017).

No gráfico 26 (c), observa-se o ajuste ao modelo de Freundlich, recomendado para superfícies heterogêneas e sistemas caracterizados por múltiplos sítios de

adsorção (ZANONI; YAMANAKA, 2016). O ajuste linearizado entre  $\ln(q_e)$  e  $\ln(C_e)$  resultou em coeficiente de determinação intermediário, semelhante ao obtido para o modelo de Langmuir, indicando que o modelo descreve o sistema apenas de forma parcial. A partir da inclinação da reta, correspondente ao termo  $1/n$ , obteve-se  $n = 1,03$ , valor ligeiramente superior a 1. O intercepto forneceu o parâmetro  $\ln(K_f)$ , resultando em  $K_f \approx 48,8$ . O valor de  $n$  caracteriza adsorção desfavorável, ou seja, a afinidade entre o corante natural e a fibra diminui com o aumento da concentração no banho, enquanto o valor de  $K_f$  indica uma capacidade inicial de adsorção apenas moderada, coerente com a tendência de dessorção observada nos ensaios cinéticos.

De forma geral, a análise conjunta da Figura 26 mostra que nenhum dos modelos avaliados descreve o sistema de maneira plenamente satisfatória. O desempenho fraco do modelo de Nernst e os ajustes apenas moderados obtidos para os modelos de Langmuir e Freundlich confirmam que a adsorção do corante natural em algodão cationizado é governada por interações fracas, multissítio e não ideais, reforçando a complexidade do processo e a limitada estabilidade termodinâmica do sistema, o que contribui para a dificuldade de obtenção de tingimentos reproduzíveis e termodinamicamente estáveis com esse tipo de corante.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS FIOS TINGIDOS

#### 4.3.1 Avaliação da solidez das amostras tingidas

Os ensaios de solidez à lavagem e à fricção foram realizados conforme metodologia da série ABNT NBR ISO 105 para solidez da cor, utilizando escala cinza de 1 a 5, em que valores 1–2 indicam solidez fraca, 3 solidez regular e 4–5 solidez boa a muito boa. Foram avaliadas a alteração de cor do substrato e a transferência de cor (manchamento) para tecidos adjacentes, tanto na lavagem quanto na fricção em condição seca e úmida.

Os resultados obtidos para as amostras tingidas com corante natural e com tricromia reativa são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Avaliação de resistência de cor

Amostra	Alteração de cor	Solidez a lavagem	Solidez a fricção a seco	Solidez a fricção à úmido
Natural	3/4	4/0	4/5	4/5
Reativo	4/5	4/5	4/5	4/5

Fonte: Autora (2025)

Para a amostra natural, observa-se solidez globalmente aceitável, porém abaixo do desempenho desejado para o artigo em estudo. Na lavagem, a classificação 4/0 indica boa solidez quanto ao manchamento, mas a alteração de cor situada entre 3 e 4 revela perda perceptível de intensidade após o ensaio, em desacordo com o nível de estabilidade cromática pretendido. Na fricção, os valores 4/5 em condição seca e úmida indicam comportamento tecnicamente satisfatório segundo a escala ABNT, mas ainda com margem limitada para usos que exigem alta resistência a atritos repetidos.

Já a amostra reativa apresentou desempenho superior e mais uniforme em todos os ensaios, com classificação 4/5 tanto para alteração de cor quanto para manchamento em lavagem e fricção. De acordo com os critérios da ABNT, esses resultados caracterizam solidez boa á muito boa, compatível com requisitos usuais para artigos têxteis de uso prolongado.

Dessa forma, embora o corante natural apresente solidez formalmente aceitável segundo a escala da ABNT NBR ISO 105, o conjunto dos resultados evidencia que o tingimento natural ainda não atinge o nível de permanência de cor exigido para substituir, de forma direta, a tricromia reativa no artigo em estudo, sobretudo no que se refere à manutenção da intensidade de cor após lavagem.

#### 4.3.2 Resistência a tração mecânica dos fios

A resistência mecânica do fio 4/2 retorcido foi avaliada nas condições de fio cru, fio pré-alvejado, fio tingido com corante reativo e fio tingido com corante natural. Na Tabela 7 são apresentados os valores médios de carga de ruptura, alongamento na ruptura, respectivos coeficientes de variação (CV%) e a resistência específica expressa em RKM para cada condição de processamento.

Tabela 7 - Propriedades de resistência e alongamento do fio 4/2 retorcido nas diferentes etapas de processamento

Parâmetros	Cru	Pré-Alvejado	Processo Reativo	Processo Natural
Média carga de ruptura (g)	4280,00	5860,00	4640,00	4000,00
CV (%)	9,55	10,07	16,17	4,68
Média alongamento (%)	7,60	9,20	7,96	7,60
CV (%)	8,13	5,75	7,83	4,95
RKM	14,07	20,60	16,12	13,76

Fonte: Autora (2025)

Observa-se que o fio pré-alvejado apresentou os maiores valores de carga de ruptura (5860 g) e de resistência específica (RKM = 20,60), indicando ganho de resistência em relação ao fio cru (4280 g; RKM = 14,07). Esse comportamento é compatível com a remoção de impurezas naturais e o maior nivelamento estrutural da fibra promovidos pelo pré-tratamento, o qual passa a constituir a condição de referência para a avaliação dos efeitos dos processos de tingimento.

Comparando-se as duas rotas tintoriais a partir do fio pré-alvejado, verifica-se que ambos os processos resultaram em redução da resistência mecânica. O tingimento com tricromia reativa apresentou carga média de ruptura de 4640 g e RKM de 16,12, enquanto o tingimento com corante natural resultou nos menores valores de resistência (4000 g e RKM de 13,76). Esses resultados indicam que a perda de resistência é mais acentuada no sistema com corante natural, aproximando-se dos níveis observados para o fio cru.

Em relação ao alongamento na ruptura, os valores permaneceram praticamente constantes entre os diferentes processos de tingimento, variando entre 7,60% e 7,96%. Essa pequena variação indica que o tingimento não provocou alterações significativas na deformabilidade do fio, sendo a principal diferença mecânica associada à capacidade de suportar carga, e não à elasticidade do material.

Os coeficientes de variação (CV%) indicam dispersão moderada dos resultados, com maior variabilidade na carga de ruptura do fio tingido com corante reativo (CV = 16,17%) e menor para o fio tingido com corante natural (CV = 4,68%). Para o alongamento, os CV% variaram de 4,95% a 8,13%, evidenciando boa repetibilidade experimental dos ensaios realizados.

De modo geral, os resultados mostram que, embora ambos os processos de tingimento impliquem redução da resistência mecânica em relação ao fio pré-alvejado, essa perda é significativamente mais pronunciada no sistema com corante natural apresentando menor Rkm. Em contrapartida, a deformabilidade do fio é preservada, o que indica que o impacto mecânico do tingimento está concentrado na resistência estrutural e deve ser considerado na avaliação da adequação do artigo final a aplicações que exigem maior desempenho mecânico.

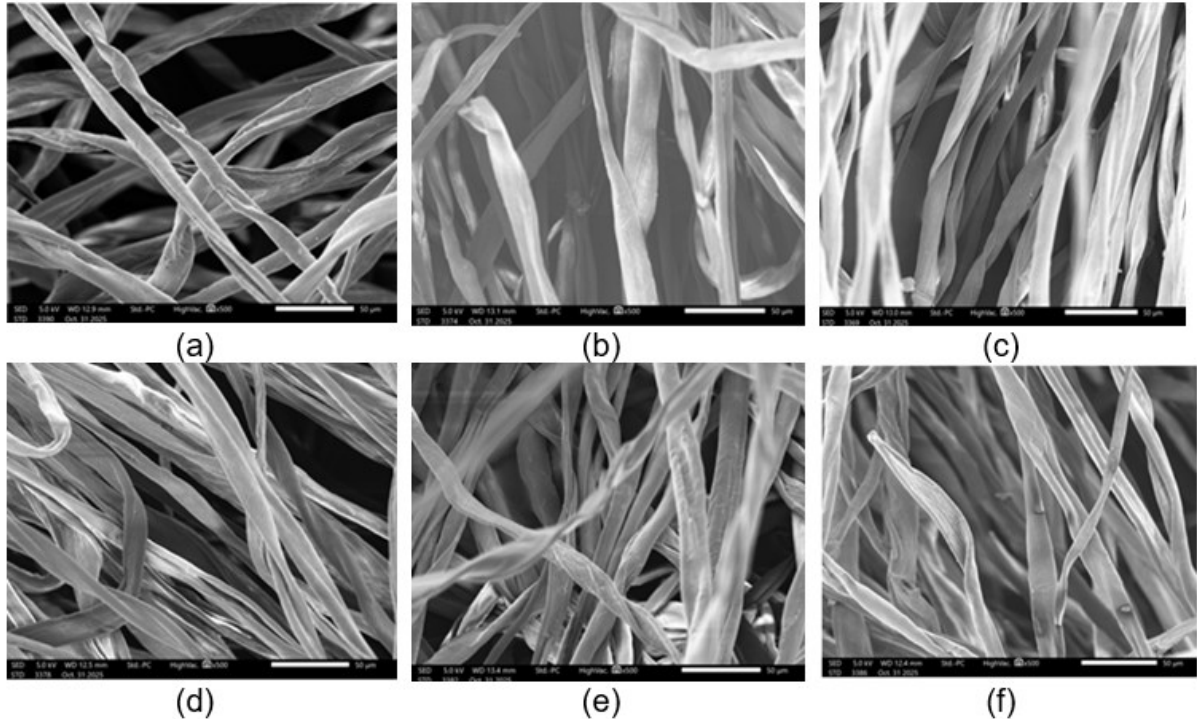
#### **4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para a avaliação morfológica das fibras de algodão em diferentes estágios de beneficiamento e após os processos de tingimento com corante natural e com tricromia de corantes reativos. Essa técnica possibilita a observação de alterações na topografia superficial, no grau de limpeza da fibra, na presença de fissuras e na ocorrência de deposição de material sobre a superfície, permitindo correlacionar essas características com os efeitos das etapas de preparo e dos diferentes mecanismos de interação corante–substrato.

As micrografias foram obtidas com aumento de 500×, condição escolhida por fornecer uma visão global do feixe de fibras, mantendo definição suficiente para distinguir variações morfológicas entre as amostras. Esse aumento permite avaliar de forma representativa a integridade estrutural das fibras e a uniformidade superficial resultante dos diferentes tratamentos aplicados.

A Figura 27 apresenta as micrografias de MEV das amostras de algodão analisadas em diferentes estágios de processamento, permitindo comparar as modificações morfológicas decorrentes do beneficiamento, da cationização e dos processos de tingimento com corante reativo e corante natural.

Figura 27 - Micrografias de MEV das amostras de algodão em diferentes estágios de processamento, aumento de 500×: (a) fibras de algodão *in natura*, (b) fio de algodão cru, (c) fio de algodão pré-alvejado, (d) fio de algodão cationizado, (e) fio de algodão tingido com corante reativo e (f) fio de algodão tingido com corante natural.



Fonte: Autora (2025)

Na micrografia 28 (a), correspondente às fibras de algodão *in natura*, observam-se torções bem definidas, superfície contínua e cutícula aparentemente intacta, características típicas de fibras não submetidas a tratamentos químicos. A morfologia indica elevada integridade estrutural, sem evidências de danos mecânicos ou químicos, representando o estado original do material fibroso.

Na micrografia 28 (b), referente ao fio de algodão cru, já submetido às etapas iniciais de beneficiamento, observa-se leve compactação do feixe de fibras e presença residual de impurezas superficiais, conferindo aspecto mais opaco e irregular à superfície. As torções características da fibra de algodão ainda são visíveis, porém com menor regularidade, indicando a permanência de ceras e componentes cuticulares.

A micrografia 28 (c), correspondente ao fio de algodão pré-alvejado, evidencia uma superfície mais limpa e homogênea, com remoção visível de resíduos naturais. Nota-se redução das torções e início de abertura da estrutura fibrilar, associado à ação oxidante do alvejamento. Essa modificação morfológica aumenta a afinidade do

substrato pela água e favorece a difusão de soluções aquosas, preparando a fibra para os tratamentos subsequentes.

Na micrografia 28 (d), referente ao algodão cationizado, observa-se uma superfície com textura mais rugosa e a presença de discretas microfissuras longitudinais. Essas alterações morfológicas estão associadas à fixação do agente catiônico, que promove expansão e modificação superficial da fibra. O aumento da rugosidade e da acessibilidade superficial indica a criação de sítios de carga positiva, favorecendo a interação eletrostática com corantes aniônicos, como os de origem natural.

A micrografia 28 (e), correspondente ao fio tingido com tricromia de corantes reativos, apresenta fibras com superfície relativamente uniforme e organizada, sem evidências de deposição superficial de partículas. A topografia observada é compatível com a difusão do corante para o interior da fibra e sua fixação intrafibrilar, característica dos corantes reativos que formam ligações covalentes com as hidroxilas da celulose. Essa morfologia está em concordância com a coloração mais homogênea e com os melhores resultados de solidez obtidos para esse sistema.

Por fim, na micrografia 28 (f), referente ao fio tingido com corante natural tom violeta, observa-se uma superfície mais heterogênea, com presença de aglomerados e partículas depositadas ao longo das fibras. Essa morfologia sugere que o corante natural foi predominantemente adsorvido na superfície da fibra, sem difusão efetiva para o interior da estrutura celulósica. A deposição superficial observada está associada à maior variabilidade de tonalidade e à menor estabilidade da cor, em concordância com os resultados colorimétricos e de solidez discutidos anteriormente.

De forma geral, a análise comparativa das micrografias evidencia um gradiente morfológico coerente com a evolução do processo de beneficiamento do algodão. As fibras *in natura* e cruas apresentam estrutura mais compacta e menor acessibilidade, enquanto o alvejamento e a cationização promovem aumento progressivo da rugosidade e da área superficial disponível para interação com os corantes. Nos processos de tingimento, o comportamento morfológico difere conforme a classe do corante: o sistema reativo apresenta indícios de fixação intrafibrilar mais uniforme, enquanto o sistema natural resulta em deposição superficial irregular. Essas observações corroboram os resultados cinéticos, colorimétricos e de solidez obtidos neste estudo, reforçando as diferenças fundamentais entre os mecanismos de interação dos corantes reativos e naturais com a fibra de algodão.

#### 4.3.4 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para avaliar as modificações químicas na estrutura da fibra de algodão ao longo das etapas de beneficiamento e após os processos de tingimento com corante natural e com tricromia de corantes reativos. Essa técnica permite identificar variações nas bandas características da celulose e de seus grupos funcionais, fornecendo subsídios para a interpretação das interações estabelecidas entre o substrato fibroso e os agentes químicos empregados nos diferentes processos (HAUSER, 2011; WARDMAN, 2017).

As análises foram realizadas no modo de transmitância, na faixa espectral de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , região amplamente utilizada para a caracterização de fibras celulósicas. Para facilitar a interpretação, os resultados foram organizados em duas etapas: (i) avaliação das modificações do substrato ao longo do beneficiamento (algodão cru, pré-alvejado e cationizado) e (ii) comparação entre os sistemas tintoriais reativo e natural após o tingimento.

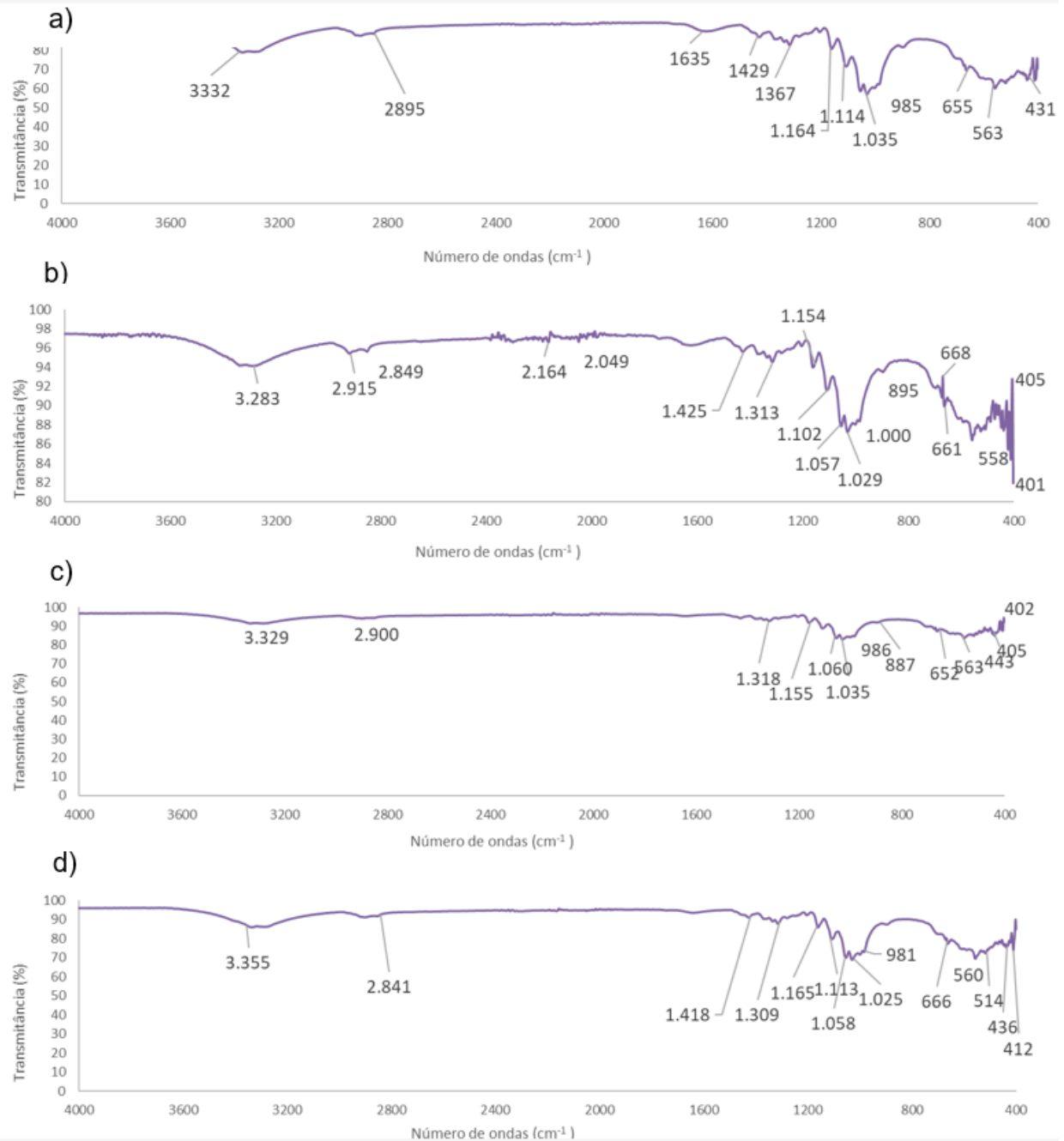
A Tabela 8 apresenta as principais bandas de absorção identificadas para as amostras analisadas, bem como suas respectivas atribuições químicas, enquanto a Figura 28 reúne os espectros obtidos para o algodão de referência, substrato cru, pré-alvejado e cationizado.

Tabela 8 - Principais bandas de absorção no infravermelho ( $\text{cm}^{-1}$ ) para as amostras de algodão nos diferentes estágios do processo.

<b>Região Média (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Amostra</b>	<b>Pico Exato (<math>\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Transmitância (%T)</b>	<b>Absorbância (A)</b>	<b>Atribuição Química Principal</b>
3330 (O-H)	Algodão	3332	71,93	0,143	O-H (Ligação de Hidrogênio)
	Cru	3334	80	0,097	O-H (Ligação de Hidrogênio)
	Alvejado	3332	74,48	0,128	O-H (Ligação de Hidrogênio)
1736 C=O	Cru	1736	94,94	0,023	C=O (Impurezas não celulósicas)
	Alvejado	1736	95,16	0,021	C=O (Impurezas não celulósicas)
1162 C-O-C	Alvejado	1162	90,72	0,042	C-O-C (Ponte Glicosídica)
	Cationizado	1162	85,34	0,069	C-O-C (Ponte Glicosídica)
1023 C-O	Cationizado	1022	64,33	0,191	C-O (Pico Principal da Celulose)
	Tingimento Reativo	1023	47,78	0,321	C-O (Celulose e Corante Reativo)
	Tingimento Natural	1023	52,26	0,282	C-O (Celulose e Corante Natural)

Fonte: Autora (2025)

Figura 28 - Espectros de FTIR (infravermelho com transformada de Fourier) das diferentes amostras estudadas:  
 a) Amostra de Algodão (referência), b) Substrato Cru (material sem tratamento), c) Substrato Alvejado, d) Substrato Cationizado.



Fonte: Autora (2025)

Em todas as amostras analisadas observa-se o perfil espectral típico da celulose, cuja fração majoritária no algodão é composta por unidades de anidro glucose contendo três grupos hidroxila por unidade repetitiva. A banda larga localizada entre aproximadamente  $3600$  e  $3200\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento O–H das hidroxilas da celulose e da água adsorvida, refletindo a extensa rede de ligações de

hidrogênio característica desse polímero (HAUSER, 2011; ZANONI; YAMANAKA, 2014).

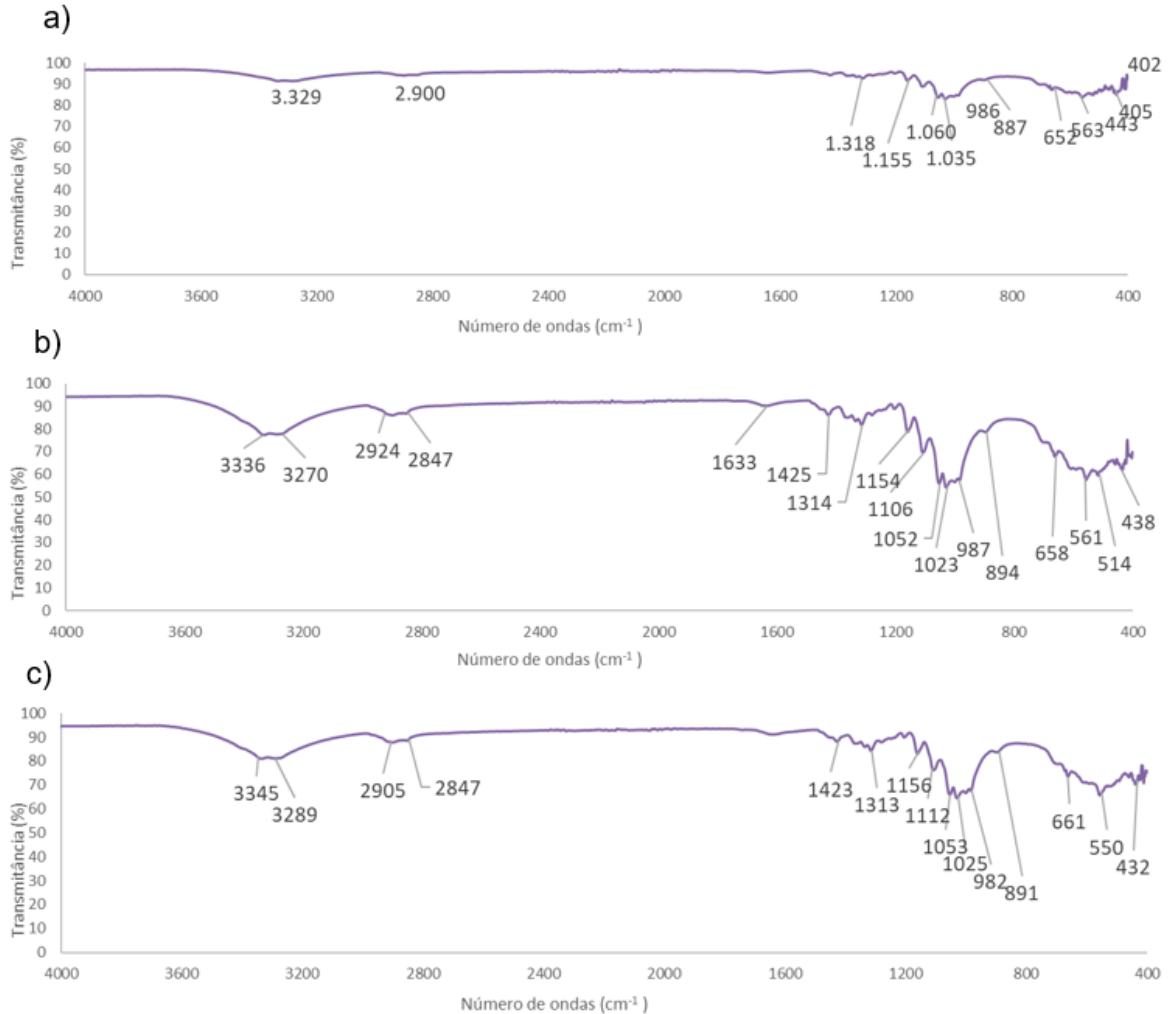
A banda observada em torno de  $1736\text{ cm}^{-1}$ , associada às vibrações de estiramento C=O de impurezas não celulósicas, como ceras, pectinas e resíduos de lignina, apresenta maior intensidade no substrato cru. Após o pré-alveamento, essa banda sofre redução, indicando a remoção parcial desses constituintes, o que confirma a eficiência do tratamento químico de limpeza da fibra (HAUSER, 2011; SHORE, 2002).

Na região compreendida entre  $1200$  e  $900\text{ cm}^{-1}$  destacam-se as bandas atribuídas às vibrações C–O–C das pontes glicosídicas e às ligações C–O do anel glicopiranosídico da celulose, com pico característico em torno de  $1023\text{ cm}^{-1}$ . Observa-se que, após a cationização, ocorre aumento da absorbância nessa região, sugerindo modificação química da superfície da fibra e maior perturbação das ligações associadas à estrutura da celulose, em decorrência da introdução de grupos catiônicos (VANKAR, 2017; ZANONI; YAMANAKA, 2014).

A Figura 29 apresenta a comparação entre os espectros do substrato pré-alvejado e das amostras após os processos de tingimento com tricromia reativa e com corante natural tom violeta.

Figura 29 - Espectros de Comparação do Tingimento:

- a) Substrato Alvejado, b) Substrato após tingimento com tricromia reativa, c) Substrato após tingimento com corante natural.



Fonte: Autora (2025)

De modo geral, os espectros das amostras tingidas mantêm o perfil característico da celulose, indicando que os processos de tingimento não promovem alterações estruturais profundas na cadeia polimérica. No entanto, diferenças na intensidade das bandas permitem inferir distintos mecanismos de interação entre os corantes e a fibra.

No caso do tingimento com tricromia de corantes reativos, observa-se aumento mais pronunciado da absorbância na região de aproximadamente 1023 cm<sup>-1</sup>

em relação ao substrato pré-alvejado. Esse comportamento é compatível com o mecanismo de fixação dos corantes reativos em fibras celulósicas, que envolve a formação de ligações covalentes entre os grupos reativos do corante e as hidroxilas da celulose sob condições alcalinas (CLARK, 2011; SHORE, 2002; WARDMAN, 2017). A maior perturbação das ligações C–O observada por FTIR está em concordância com a maior uniformidade de cor e os melhores resultados de solidez obtidos para esse sistema.

Para o tingimento com corante natural, aplicado sobre substrato previamente cationizado, o aumento de absorvância nessa mesma região também é observado, porém com menor intensidade. Esse resultado indica a incorporação do corante à fibra predominantemente por interações físico-químicas e eletrostáticas mediadas pelos grupos catiônicos introduzidos, sem evidências claras de formação de ligações covalentes estáveis com a cadeia celulósica, conforme descrito para sistemas baseados em corantes naturais e mordentáveis (VANKAR, 2017; ZANONI; YAMANAKA, 2014).

A Tabela 9 apresenta a comparação quantitativa da absorvância na região de  $1023\text{ cm}^{-1}$  para os dois sistemas tintoriais, tomando como base os respectivos substratos de referência.

Tabela 9 - Comparação da Absorvância na região C-O  $1023\text{ cm}^{-1}$

<b>Amostra</b>	<b>Base de Comparação</b>	<b>Absorvância (A) em <math>\sim 1023\text{ cm}^{-1}</math></b>	<b>Aumento Relativo em A (vs Base)</b>
Tingimento Reativo	Alvejado (A=0,210)	0,321	52,86%
Tingimento Viola (Natural)	Cationizado (A=0,191)	0,282	47,64%

Fonte: Autora (2025)

Observa-se que o tingimento reativo apresentou aumento relativo de absorvância de 52,86% em relação ao substrato pré-alvejado, enquanto o tingimento com corante natural apresentou aumento de 47,64% em relação ao substrato cationizado. Embora ambos os sistemas indiquem retenção significativa de cromóforos na fibra, o valor ligeiramente inferior obtido para o corante natural confirma a menor densidade de grupos cromóforos incorporados, em concordância com a

menor intensidade colorística e a maior variabilidade observadas nas análises colorimétricas.

De forma integrada, os resultados de FTIR corroboram as análises morfológicas (MEV), cinéticas e de solidez, evidenciando que o sistema reativo promove maior incorporação intrafibrilar do corante, enquanto o sistema natural apresenta fixação predominantemente superficial, dependente de interações físicas e eletrostáticas. Esses resultados reforçam as diferenças fundamentais entre os mecanismos de ancoragem dos corantes reativos e naturais na fibra de algodão, contribuindo para a compreensão das limitações e potencialidades de cada rota tintorial (CLARK, 2011; HAUSER, 2011; WARDMAN, 2017).

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES

O estudo de caracterização dos efluentes gerados contemplou análises físico-químicas, incluindo pH, cor aparente, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Sólidos Totais Dissolvidos (TDS) e nutrientes, bem como avaliação de ecotoxicidade aguda por meio de ensaios com *Daphnia magna*. Essas análises foram conduzidas com o objetivo de atender ao objetivo específico (d) e fornecer subsídios técnicos para a análise comparativa da viabilidade ambiental dos sistemas tintoriais avaliados, conforme o objetivo (e).

Os efluentes analisados correspondem às correntes líquidas geradas nas etapas de preparação, tingimento, lavagens e amaciamento, coletadas de forma integrada para cada sistema tintorial, representando a composição típica do efluente bruto gerado pelo processo. Os resultados das análises físico-químicas são apresentados na Tabela 10 e discutidos de forma comparativa nas subseções a seguir.

Tabela 10 - Parâmetros físico-químicos dos efluentes gerados

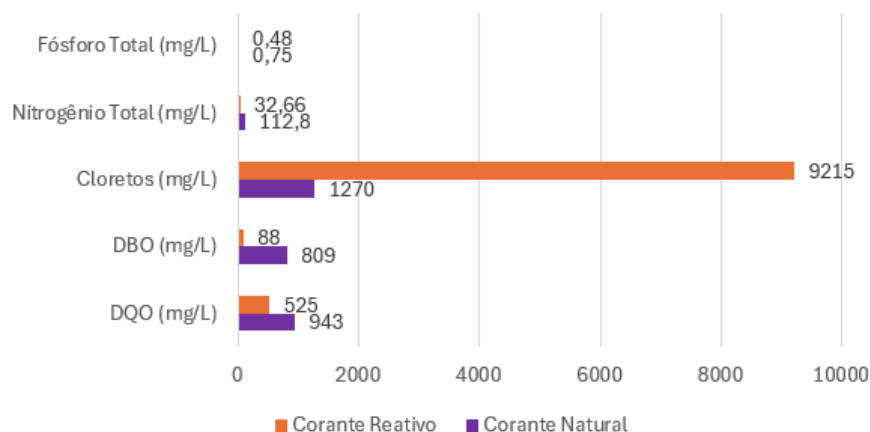
Parâmetro	Corante Natural	Corante Reativo	Interpretação Ambiental/Tratabilidade
CE50 (% v/v)	2,21	35,36	Natural mais tóxico (16x mais)
Fator Tóxico (FT)	64	4	Natural extremamente tóxico
pH médio	≥10	9,5–11	Natural mais alcalino em 5 banhos
Turbidez (NTU)	58	4,1	Natural com 10x mais sólidos suspensos
DQO (mg/L)	≥943	≥525	Natural com maior carga orgânica
DBO (mg/L)	≥809	≤88	Natural excede padrão legal (60 mg/L)
DBO/DQO	0,09	<0,2	Baixa biodegradabilidade; natural mais crítico
Cloretos (mg/L)	≤1270	9215	Reativo com 7x mais salinidade
Alcalinidade (mg/L)	≤1070	675.000	Reativo com pH extremamente elevado
Nitrogênio Total (mg/L)	112,8	32,66	Natural com 4x mais N – risco de eutrofização
Fósforo Total (mg/L)	0,75	0,48	Reativo com mais fósforo – floração algal

Fonte: Dados laboratoriais (Ekonova, 2025)

#### 4.4.1 Caracterização físico-química e colorimétrica dos efluentes

A Figura 30 sintetizam os resultados físico-químicos e de nutrientes dos efluentes gerados nos processos de tingimento com corante natural e com tricromia de corantes reativos.

Figura 30 - Parâmetros orgânicos e inorgânicos dos efluentes



Fonte: Autora (2025)

Observa-se que o efluente do tingimento natural apresentou valores elevados de DQO ( $943 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) e DBO ( $809 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), com razão DBO/DQO igual a 0,09, indicando a presença de matéria orgânica recalcitrante e baixa biodegradabilidade, característica frequentemente associada à presença de compostos fenólicos e taninos de origem vegetal (BECHTOLD et al., 2006).

O pH médio de ambos os sistemas foi superior a 9,5, indicando a necessidade de neutralização prévia antes do lançamento em corpos receptores ou do encaminhamento à estação de tratamento de efluentes. A turbidez observada no efluente natural foi cerca de dez vezes superior à do sistema reativo, evidenciando maior carga de sólidos suspensos, possivelmente associada à presença de partículas de extrato vegetal não fixadas à fibra.

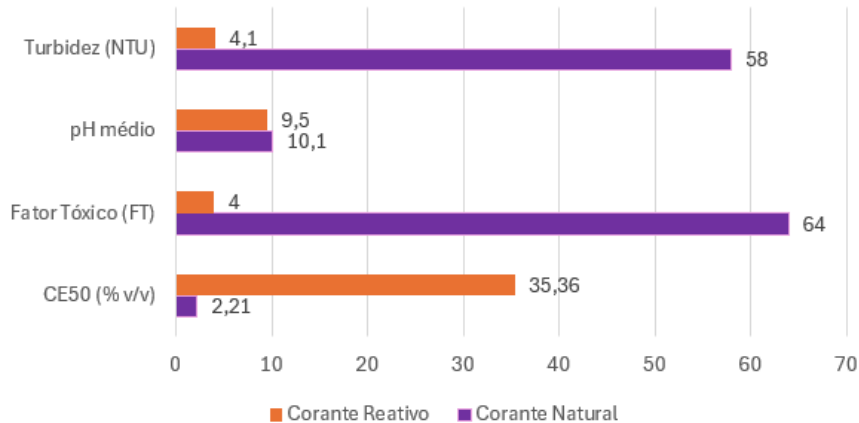
Em relação aos parâmetros inorgânicos, o efluente do sistema reativo apresentou concentração significativamente mais elevada de cloretos ( $9.215 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), aproximadamente sete vezes superior ao valor máximo observado para o efluente natural ( $\leq 1.270 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), bem como elevada alcalinidade total. Esse comportamento está diretamente relacionado ao uso intensivo de eletrólitos e agentes alcalinizantes nos processos com corantes reativos, empregados para promover o esgotamento e a fixação do corante (WARDMAN, 2017).

Quanto aos nutrientes, o efluente natural apresentou maior concentração de nitrogênio total, enquanto o efluente reativo exibiu teor mais elevado de fósforo total, ambos com potencial contribuição para processos de eutrofização caso não sejam adequadamente tratados. Em síntese, a caracterização físico-química evidencia perfis distintos de impacto ambiental: o sistema natural é dominado por elevada carga orgânica pouco biodegradável, enquanto o sistema reativo se caracteriza pela alta salinidade, alcalinidade e presença de cor residual, aspectos amplamente descritos na literatura para processos com corantes reativos (YAGUB et al., 2012; WARDMAN, 2017).

#### **4.4.2 Avaliação ecotoxicológica dos efluentes**

A avaliação ecotoxicológica foi realizada por meio de ensaios de toxicidade aguda com *Daphnia magna*, cujos resultados de CE50, Fator Tóxico (FT), pH e turbidez estão apresentadas na Tabela 10 e na Figura 31.

Figura 31 – Parâmetros de toxicidade, turbidez e pH dos efluentes



Fonte: Autora (2025)

Os resultados indicam que o efluente do corante natural apresentou CE50 = 2,21 % (v/v) e FT = 64, sendo classificado como altamente tóxico segundo a ABNT NBR 12713:2022, enquanto o efluente do sistema reativo apresentou CE50 = 35,36 % (v/v) e FT = 4, caracterizando toxicidade aguda moderada.

A maior toxicidade observada no efluente natural está associada à presença de compostos fenólicos e taninos liberados durante o processo de tingimento, os quais podem provocar efeitos adversos significativos em organismos aquáticos mesmo em baixas concentrações. Em contraste, o efluente do sistema reativo apresentou toxicidade aguda inferior, porém permanece ambientalmente limitado pela elevada salinidade, alcalinidade e pela presença de cor residual decorrente do corante reativo hidrolisado não fixado à fibra (WANG et al., 2025).

De forma integrada, os resultados físico-químicos e ecotoxicológicos demonstram que a substituição de corantes reativos por corantes naturais não elimina os impactos ambientais associados ao tingimento têxtil, mas modifica sua natureza. Enquanto o sistema reativo gera efluentes com elevada carga inorgânica e dificuldades associadas ao tratamento de salinidade e cor, o sistema natural produz efluentes com maior toxicidade aguda e baixa biodegradabilidade. Dessa forma, cada rota tintorial demanda estratégias específicas de tratamento, e a adoção de corantes naturais deve ser acompanhada de soluções tecnológicas adequadas para a mitigação de seus impactos ambientais (ZHU et al., 2024).

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo comparar o desempenho técnico e ambiental de um corante natural tom violeta, pertencente à classe dos mordentáveis, e de uma tricromia de corantes reativos sintéticos aplicados ao tingimento de fio 100% algodão na tonalidade violeta (Pantone® 15-3508), em escala laboratorial e produtiva. Os resultados obtidos permitiram compreender as diferenças fundamentais entre os dois sistemas, tanto em termos de comportamento tintorial quanto nos aspectos estruturais, mecânicos e ambientais envolvidos no processo.

A tonalidade de referência obtida com o corante natural apresentou intensidade colorística intermediária ( $K/S \approx 1,7$ ) e aspecto visual homogêneo, porém com variação significativa entre repetições de laboratório, refletida em valores de  $\Delta E^*$  superiores ao limite de aceitação industrial. Essa instabilidade cromática confirma a dificuldade de reprodutibilidade do sistema natural, mesmo sob controle rigoroso de processo. Em contrapartida, a tricromia reativa desenvolvida a partir da cor natural reproduziu a tonalidade alvo com  $\Delta E^*$  dentro da faixa de aceitação e força colorística adequada, demonstrando maior previsibilidade e estabilidade, características que a tornam mais robusta e tecnicamente viável para aplicação produtiva.

Os estudos cinéticos e isotérmicos evidenciaram que o sistema reativo apresentou comportamento de exaustão regular e coerente com um mecanismo de difusão seguido de fixação química no interior da fibra, enquanto o sistema natural exibiu oscilações de concentração, baixa aderência aos modelos teóricos e tendência à dessorção. Essa diferença reflete a natureza das interações estabelecidas: predominantemente físico-químicas superficiais no caso do corante natural e químicas, do tipo covalente, no sistema reativo. As análises de MEV e FTIR corroboraram esses resultados, mostrando, no sistema reativo, fibras de superfície contínua e limpa, indicativas de difusão interna, e, no sistema natural, deposição de partículas e agregados superficiais, compatíveis com fixação mais fraca e irregular.

As propriedades mecânicas do fio mantiveram-se estáveis após os diferentes tratamentos. O título, a torção e a resistência à tração permaneceram dentro das faixas esperadas, indicando que os processos de preparação e tingimento não comprometeram a integridade estrutural do fio 4/2 retorcido. A solidez da cor foi classificada como boa em ambos os sistemas, embora o tingimento natural tenha apresentado perda perceptível de intensidade após lavagem e fricção, o que confirma

sua menor estabilidade cromática. Esses resultados demonstram que, nas condições estudadas, as principais limitações do sistema natural concentram-se na fixação superficial e na baixa reprodutibilidade de cor, e não em danos à estrutura têxtil.

A avaliação ambiental comparativa indicou que ambos os sistemas apresentam desafios específicos. O tingimento reativo resultou em efluentes de alta salinidade, alcalinidade e cor residual intensa, demandando tratamento físico-químico mais complexo. O sistema natural, por sua vez, gerou efluentes de menor carga salina, mas com DBO e DQO elevadas, baixa biodegradabilidade e toxicidade aguda acentuada, associadas à presença de compostos fenólicos e taninos de origem vegetal. Assim, não há um sistema intrinsecamente mais sustentável: o processo reativo é penalizado pela carga inorgânica e pela coloração persistente, enquanto o natural é limitado pela carga orgânica e pela toxicidade dos extrativos.

Com base nesses resultados, conclui-se que o corante natural tom violeta, nas condições de aplicação estudadas, ainda não apresenta desempenho técnico suficiente para substituir diretamente a tricromia reativa no tingimento de algodão. No entanto, apresenta potencial relevante como alternativa complementar, especialmente em produtos de apelo sustentável e em processos otimizados para reduzir impacto ambiental. Seu uso industrial dependerá do aprimoramento do processo de cationização, da purificação do extrato e do controle das variáveis de tingimento, de modo a estabilizar a cinética de adsorção e melhorar a fixação do corante na fibra.

Diante das limitações e oportunidades identificadas, futuras investigações devem concentrar-se no refinamento da formulação e da rota de aplicação do corante natural, explorando variações de pH, temperatura, concentração de agente cationizante e possíveis combinações com biomordentes. A purificação do extrato, com foco na redução de compostos fenólicos e no aumento da estabilidade da cor, também se mostra uma etapa promissora. Recomenda-se ainda ampliar o estudo cinético e termodinâmico com modelos mais complexos que considerem a heterogeneidade de sítios e as etapas de difusão no interior da fibra, bem como investigar tratamentos específicos para efluentes contendo corantes naturais, associando processos oxidativos e biológicos. A expansão dos ensaios para tecidos planos e malhas permitirá avaliar o desempenho prático em produtos confeccionados e validar o comportamento em condições reais de uso.

De forma geral, os resultados obtidos reforçam que a substituição direta dos corantes reativos por naturais não deve ser compreendida como uma troca simples

de insumos, mas como parte de uma abordagem integrada de inovação e sustentabilidade no processo têxtil. O caminho mais promissor consiste na coexistência das duas tecnologias, em que os corantes naturais possam ser incorporados de maneira estratégica, equilibrando desempenho técnico, impacto ambiental e valor agregado ao produto.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13214:1994 – Têxteis — Determinação do título de fios têxteis. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 105-C06:2010 – Têxteis — Ensaio de solidez da cor — Parte C06: Solidez da cor à lavagem doméstica e comercial. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 105-X12:2012 – Têxteis — Ensaio de solidez da cor — Parte X12: Solidez da cor à fricção. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AGUIAR, C. R. L. de; SCHMIDT, M.; GRANATO, M. A.; CORREA, V. H. M. Capítulo 5 – Beneficiamento. In: AGUIAR, C. R. L. de (org.). **Engenharia têxtil: uma abordagem simplificada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2022. p. 167–193.

AL-TOHAMY, R. et al. Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 230, 113160, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>.

ARAÚJO, M. E. M. Corantes naturais para têxteis – da Antiguidade aos tempos modernos. *Conservar Património*, Lisboa, n. 3/4, p. 39–51, 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/5136/513653427004.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1422-99: Standard Test Method for Twist in Single Spun Yarns by the Direct-Counting Method. West Conshohocken: ASTM International, 1999.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2256/D2256M-02(2016): Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

BECHTOLD, T.; TURCZA, H.; GEISSER, W. Natural dyes for textile dyeing: a comparison of traditional dyeing methods and modern dyeing technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 14, p. 145–151, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.01.005>.

BROADBENT, A. D. **Basic Principles of Textile Coloration**. West Yorkshire: Society of Dyers and Colourists, 2001.

BURKINSHAW, S. M. **Physico-Chemical Aspects of Textile Coloration**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

CIE – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE. **Colorimetry**. 3rd ed. CIE Publication 15:2004. Vienna: CIE, 2004.

CLARK, M. (ed.). **Handbook of Textile and Industrial Dyeing. Volume 1: Principles, Processes and Types of Dyes**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.

CRIPPA, M.; CARDON, D.; TAMBURINI, D. et al. Molecular structure of the colour-giving molecules present in lac dye. *Journal of Cultural Heritage*, v. 75, p. 307–325, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2025.01.015>.

CRISTEA, D.; VILAREM, G. Improving light fastness of natural dyes on cotton yarn. *Dyes and Pigments*, v. 70, n. 3, p. 238–245, 2006.

DAI, C.; FAN, Q.; ZHANG, X. Isotherm and kinetic studies of dye adsorption from aqueous solution using natural materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102948>.

DATACOLOR. Essenciais da Ciência da Cor. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.datacolor.com/pt-br/business-solutions/centro-de-aprendizagem/color-science-essentials/>. Acesso em: 21 ago. 2025.

DE SOUZA FERREIRA, I. L. de et al. The effect of seawater hardness on cotton fabric dyeing using reactive blue dye. *Coloration Technology*, p. 1–12, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/cote.70021>.

FARABEGOLI, F. et al. **Manual Técnico de Tingimento com Corantes Reativos**. Blumenau: Fitec, 2010.

FARABEGOLI, G. et al. Decolorization of Reactive Red 195 by a mixed culture in an alternating anaerobic–aerobic sequencing batch reactor. *Biochemical Engineering Journal*, v. 52, p. 220–226, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.08.014>.

FRATELLI. Características sobre comportamento químico e aplicação do corante natural *Kerria lacca*. Relatório técnico. [S. l.]: Fratelli, 2024.

FRATELLI. **Tingimento natural: um e-book para designers**. São Paulo: Biodye, 2018. Cap. 2, p. 7–10; cap. 3, p. 12–13.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual prático de tratamento de água para pequenas comunidades**. Brasília: FUNASA, 2007.

**GLOBAL ORGANIC TEXTILE STANDARD.** Global Organic Textile Standard (GOTS)–Version 7.0.[S. l.]: GOTS, 2023.

GOMES DA SILVA, M. G. da. Corantes naturais no tingimento e acabamento antimicrobiano e anti-UV de fibras têxteis. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Têxtil) – Universidade do Minho, Guimarães, 2015.

GULRAJANI, M. L. **Textile Wet Processing.** New Delhi: Department of Textile Technology, IIT Delhi, 2010.

HAJI, A.; SHAHIDI, S.; KHALILI, M. Dyeing of wool and cotton fabrics with natural dye extracted from *Rubia cordifolia*. *Journal of Natural Fibers*, v. 16, n. 2, p. 1–14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1469457>.

HAUSER, P. J. (ed.). **Textile Dyeing.** Rijeka: InTech, 2011.

ISLAM, M. I. Process flow chart of yarn spinning technology. *Textile Learner*, 2011. Disponível em: <https://textilelearner.net/process-flow-chart-of-yarn-spinning-technology/>. Acesso em: 27 out. 2025.

ISLAM, S. et al. Comparative study on natural and reactive dyes for cotton coloration: environmental and performance assessment. *Journal of Applied Research and Technology*, v. 20, n. 3, p. 150–162, 2022.

ISLAM, T. et al. Impact of textile dyes on health and ecosystem: a review of structure, causes, and potential solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28323-3>.

JADHAV, S. B. et al. Reactive dyes and their applications. *Journal of Textile Science & Engineering*, v. 3, p. 112–118, 2009.

KERTÉSZ, A. et al. Usage of *Tagetes* and *Tanacetum* as dye plants for natural and artificial fibers. *Open Agriculture*, v. 3, p. 345–352, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0031>.

MAI, T. H.; GRETHE, T.; MAHLTIG, B. Extratos de madeira para tingimento de tecidos de algodão: visão especial sobre procedimentos de mordanação. *Textiles*, v. 4, n. 2, p. 138–164, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/textiles4020010>.

MAITI, T.; ROY MAULIK, S. (eds.). **Sustainable Coloration Techniques in Textiles.** Cham: Springer, 2023.

MALUF, E.; KOLBE, W. **Dados técnicos para a indústria têxtil.** 2. ed. São Paulo: IPT; ABIT, 2003.

MATHER, R. R.; WARDMAN, R. H. **The chemistry of textile fibres**. 2. ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2011.

McDONALD, R.; FAIRCLOUGH, J. P. **Colour Physics for Industry**. 4. ed. West Yorkshire: Society of Dyers and Colourists, 2014.

NAMBELA, L. Application of natural plant-based dyes in sustainable textile coloration. *Research Journal of Textile and Apparel*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/RJTA-04-2023-0043>.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Brasília: Nações Unidas, 2015.

PANTONE. **Fashion, Home + Interiors Color Passport: Cotton Passport**. Carlstadt: Pantone LLC, 2013.

PAUL, R.; GENESCA, E. The use of enzymatic techniques in the finishing of technical textiles. In: **Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

PICCOLI, N. B. Corantes naturais: uma alternativa ambientalmente sustentável para a indústria têxtil. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PIZZICATO, B. et al. Avanços em corantes naturais sustentáveis para aplicações têxteis: uma revisão. *Molecules*, v. 28, n. 16, 5954, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28165954>.

RAMLOW, H. Destilação por membrana aplicada ao tratamento de águas residuais da indústria têxtil. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

REIMER, L. **Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis**. 2. ed. Berlin: Springer, 1998.

ROSA, J. M.; TRINDADE, N. B.; BORELLI, C.; ARAÚJO, M. C. **Tingimento têxtil sem segredos: desvendando procedimentos e insumos químicos**. Curitiba: Editora CRV, 2025.

ROSA, J. M. et al. Application of continuous H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV advanced oxidative process as an option to reduce the consumption of inputs, costs and environmental impacts of textile effluents. *Journal of Cleaner Production*, v. 246, 119012, 2020.

SALEM, V. Curso de tingimento têxtil – módulo 1 e 2. [S. l.: s. n.], 2000.

SALEM, V.; VIDAL. **Tingimento têxtil: fibras, conceitos e tecnologias**. São Paulo: Blucher; Golden Tecnologia, 2010.

SANTOS, L. D. dos et al. Sustentabilidade na indústria têxtil: perspectivas do uso de corantes naturais. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 27, n. 3, p. 150–162, 2023.

SCHANDA, J. **Colorimetry: Understanding the CIE System**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

SHORE, J. **Cellulosics Dyeing**. Bradford: Society of Dyers and Colourists, 1995.

SHORE, J. **Colorants and Auxiliaries. Volume 1: Colorants**. 2. ed. Bradford: Society of Dyers and Colourists, 2002.

SHORE, J. **Colorants and Auxiliaries. Volume 2: Auxiliaries**. Bradford: Society of Dyers and Colourists, 2002.

SHU, H. et al. Eco-friendly dyeing of cotton fabric using recycled water and reactive dyes. *Pigment & Resin Technology*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1108/PRT-09-2023-0082>.

SILVA, K. M. de S. Descrição das tecnologias de tratamentos de água no Brasil e suas distribuições por regiões no país. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal da Paraíba, Cajazeiras, 2020.  
SILVA, M. G. da. Corantes naturais no tingimento e acabamento antimicrobiano e anti-UV de fibras têxteis. Guimarães: Universidade do Minho, 2018.

STADTBIBLIOTHEK NÜRNBERG. Hausbuch der Mendelschen Zwölfbrüderstiftung – Mendel I. Fol. 39r. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://online-service.nuernberg.de/viewer/image/5d64f831-7a9d-47b4-9a01-d6a28f29ad99/79/>. Acesso em: 8 jun. 2025.

SUN, S. et al. Adsorption and dyeing properties of acid dyes on fine denier silk fibers. *Textile Research Journal*, v. 89, n. 17, p. 3545–3555, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517519869389>.

UNITED NATIONS. **The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace**. Paris: UNESCO, 2024.

VANKAR, P. S. **Natural Dyes for Textiles: Sources, Chemistry and Applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.

WAKELYN, P. J. et al. **Cotton fiber chemistry and technology**. Boca Raton: CRC Press, 2007.

WANG, R.; LI, Y.; LU, Z.; MAO, Z. Study of the hydrolysis kinetics of reactive dyes by capillary electrophoresis and optimisation of alkaline agent for the dyeing process. *Coloration Technology*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/cote.70045>.

WARDMAN, R. H. **An Introduction to Textile Coloration: Principles and Practice**. Chichester: John Wiley & Sons; Society of Dyers and Colourists, 2017.

WORLD DYE VARIETY. Reactive Blue 222. 2025. Disponível em: <https://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-blue-222.html>. Acesso em: 5 out. 2025.

WORLD DYE VARIETY. Reactive Red 195. 2025. Disponível em: <https://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-red-195.html>. Acesso em: 5 out. 2025.

YAGUB, M. T. et al. Dye and pigment removal from wastewater using adsorption techniques: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 113, p. 236–249, 2012.

YUSUF, M. et al. A natural yellow colorant from *Curcuma longa* for sustainable cotton dyeing. *Dyes and Pigments*, v. 191, 109367, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109367>.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. (orgs.). **Corantes**. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

**ZDHC FOUNDATION**. ZDHC Manufacturing Restricted Substances List (MRSL). Version 3.1.[S. l.]: ZDHC Foundation, 2022.

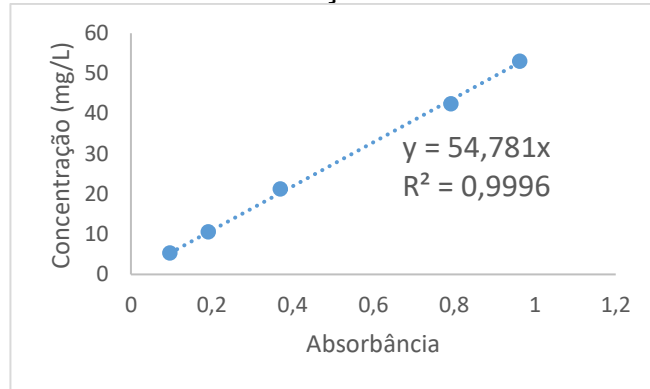
ZHU, Y. et al. Carbon footprint of cotton fabrics dyed with reactive dyes: comparative life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02323-9>.

ZHU, Y. et al. Environmental footprint assessment of natural and reactive dyeing processes for cotton fabrics. *Journal of Cleaner Production*, v. 394, 136352, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136352>.

### Apêndice A – Curva de calibração dos corantes

A determinação da equação, para cada concentração, foi medida a absorvância e, em seguida, por meio de regressão linear, foi obtida a equação da reta.

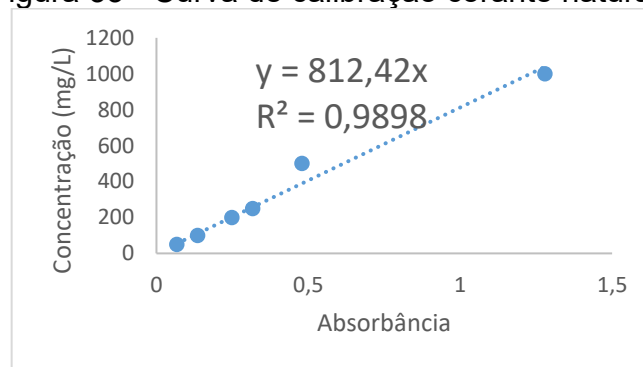
Figura 32 - Curva de calibração da tricromia reativa



Fonte: Autora (2025)

Pela equação da reta obtida, cujo coeficiente  $R^2$  de valor 0,9996, comprova-se com 99,96% de chance a correspondência entre a reta de calibração obtida e os valores experimentais medidos de absorvância para a tricromia de corantes reativos.

Figura 33 - Curva de calibração corante natural



Fonte: Autora (2025)

A determinação da equação, para cada concentração, foi medida a absorvância e, por meio de regressão linear, foi obtida a equação da reta para a determinação das concentrações de corante nos banhos cinéticos. A curva de calibração pode ser observada na, com uma linearidade excelente ( $R^2 \approx 0,9898$ ), indicando que o sistema obedece de forma robusta à Lei de Lambert–Beer. Essa correlação elevada garante que pequenas variações de absorvância correspondam a alterações reais de concentração, permitindo acompanhar com precisão a evolução do tingimento ao longo dos ensaios.