



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS BLUMENAU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

Michele Schmidt

**Avaliação do potencial tintorial do extrato da cúrcuma sobre fibras têxteis e a liberação  
do seu princípio ativo curcumina**

Blumenau - SC

2022

Michele Schmidt

**Avaliação do potencial tintorial do extrato da cúrcuma sobre fibras têxteis e a liberação  
do seu princípio ativo curcumina**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Têxtil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Catia Rosana Lange de Aguiar.  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andréa Cristiane Krause Bierhalz.

Blumenau - SC

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schmidt, Michele

Avaliação do potencial tintorial do extrato da cúrcuma sobre fibras têxteis e a liberação do seu princípio ativo curcumina / Michele Schmidt ; orientadora, Catia Rosana Lange De Aguiar, coorientadora, Andréa Cristiane Krause Bierhalz, 2022.

137 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Cúrcuma. 3. Tingimento com corante natural. 4. Liberação de curcumina. 5. Adsorção. I. De Aguiar, Catia Rosana Lange. II. Bierhalz, Andréa Cristiane Krause. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Michele Schmidt

**Avaliação do potencial tintorial do extrato da cúrcuma sobre fibras têxteis e a liberação do seu princípio ativo curcumina**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Antônio Augusto Ulson de Souza, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Nivea Tais Vila, Dr.(a)  
Universidade Estadual de Maringá

Prof.(a) Catia Rosana Lange de Aguiar, Dr.(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

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.(a) Rita de Cássia Siqueira Curto Valle, Dr.(a)  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil

---

Prof.(a) Catia Rosana Lange de Aguiar, Dr.(a)  
Orientadora

Blumenau, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus pais e a todos os profissionais apaixonados pelo mundo têxtil.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, pelo suporte estrutural e acadêmico durante esta jornada e por me proporcionar experiências incríveis durante a realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), pela concessão de bolsa de mestrado durante todo o período.

À Deus, autor de tudo que existe, pelo amor infinito por mim, tornando tudo possível.

À minha família, em especial aos meus pais, Waltair e Vanusa, pela compreensão e incentivo na realização deste sonho.

Às minhas amigas, Bárbara Marthendal e Isabela Correa por sempre estarem presentes na minha vida.

À minha orientadora Cátia e coorientadora Andrea, por terem acreditado em mim no desenvolvimento desta dissertação, pela imensa contribuição, orientação, conversas, conselhos e conhecimentos compartilhados. Com certeza, essa caminhada foi mais tranquila com vocês ao meu lado. Vocês são meus exemplos.

Aos meus colegas de mestrado, colegas de laboratório e amigos para vida. Em especial, Renan Felinto, Victor Fischer e Salésio Junior pelos bons momentos e por tornar esta caminhada mais divertida.

A todos os docentes da UFSC, por compartilhar tanto conhecimento, experiências, e pela disposição em auxiliar, sempre prezando pelo desenvolvimento da educação e da pesquisa científica. Em especial à professora Deise Baggio pelo extremo auxílio nos ensaios antimicrobianos.

Às empresas Cremer, OTL, Colorquímica e Werken pela doação dos materiais necessários para a realização dos experimentos desta pesquisa.

Por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para meu crescimento profissional e pessoal neste período de grande relevância para minha formação.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens,  
mas em ter novos olhos” Marcel Proust.

## RESUMO

A cúrcuma é uma planta originária do subcontinente indiano e é amplamente utilizada em indústrias alimentícias, cosmética, têxtil e farmacêutica por suas características colorísticas e terapêuticas comprovadas (antioxidante, anti-inflamatória, cicatrizante). Nos últimos anos, houve um aumento industrial considerável no uso de produtos naturais e ecologicamente corretos, em especial na indústria têxtil, que cada vez mais vem buscando opções sustentáveis em seus processos e produtos. Diante disso, o presente estudo buscou entender os fenômenos físicos e químicos relacionados à adsorção do extrato da cúrcuma sobre as fibras de algodão e poliamida, pelo processo de tingimento têxtil por esgotamento, assim como o mecanismo de liberação de seu princípio ativo a partir dos têxteis tingidos. Foram avaliados diferentes métodos de extração de curcumina a partir da cúrcuma em pó comercial, e diferentes concentrações de extrato no processo de tingimento, assim como, diferentes proporções de volume de etanol para dessorção. A extração pelo método de agitação na temperatura de 60°C com etanol, apresentou os melhores resultados de rendimento em curcumina. Nos ensaios de tingimento, observou-se que todas as concentrações apresentaram cor amarelo intenso, entretanto, maiores concentrações de corante proporcionaram maiores quantidades de corante na fibra. Para ambas as fibras, o tempo de equilíbrio de adsorção foi inferior a 25 min, e o modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor representou os dados cinéticos do tingimento, indicando que o tingimento pode ser controlado pelo processo de quimissorção. Nas isotermas de adsorção do tingimento, o modelo de Freundlich se adequou melhor para o algodão, mostrando uma interação fraca entre a fibra e a curcumina, e o modelo de Langmuir para a poliamida, mostrando interação superior devido a curcumina e a fibra possuírem polaridades opostas. Os parâmetros termodinâmicos indicam que as interações entre a curcumina e as fibras não são espontâneas para o algodão, assumindo um processo endotérmico e espontânea. Para a fibra de poliamida foi observado um processo exotérmico, mostrando novamente o diferente comportamento das fibras no processo de adsorção da curcumina. Por meio da análise de FTIR, observaram-se alterações na fibra de poliamida tingida, sugerindo a existência de interações químicas, e a análise microscópica não indicou alterações morfológicas na superfície das fibras. Os testes de solidez à lavagem, fricção e água indicaram uma maior resistência da cor para a poliamida, principalmente em meio úmido. Já os ensaios de solidez à luz apresentaram baixa resistência de cor para ambas as fibras. Os ensaios de dessorção da curcumina com os tecidos tingidos apresentaram melhores resultados em solução de 100% etanol, porém com um total liberado de apenas 0,88% e 0,97% para a poliamida e algodão, respectivamente. A dessorção apresentou um comportamento sustentado por 12 horas, adequando-se ao modelo matemático de Higuchi, que indica um processo de liberação puramente difusivo. Nos ensaios antimicrobianos, as amostras tingidas não apresentaram atividades inibitórias, sugerindo uma concentração ineficiente de curcumina e influência na metodologia de extração.

**Palavras-chave:** Cúrcuma. Tingimento com corante natural. Liberação de curcumina

## ABSTRACT

Turmeric is a plant originally from the Indian subcontinent and is widely used in the food, cosmetic, textile and pharmaceutical industries for its proven color and therapeutic characteristics (antioxidant, anti-inflammatory, healing). In recent years, there has been a considerable industrial increase in the use of natural and ecologically correct products, especially in the textile industry, which is increasingly seeking sustainable options in its processes and products. Therefore, the present study sought to understand the physical and chemical phenomena related to the adsorption of turmeric extract on cotton and polyamide fibers, by the textile dyeing process by exhaustion, as well as the mechanism of release of its active principle from dyed textiles. Different methods of extracting curcumin from commercial turmeric powder were evaluated, and different concentrations of extract in the dyeing process, as well as different proportions of volume of ethanol for desorption. The extraction by the method of stirring at a temperature of 60°C with ethanol, showed the best results in curcumin yield. In the dyeing tests, it was observed that all concentrations presented an intense yellow color, however, higher concentrations of dye provided greater amounts of dye in the fiber. For both fibers, the adsorption equilibrium time was less than 25 min, and the pseudo-second order model was the one that best represented the dyeing kinetic data, indicating that dyeing can be controlled by the chemisorption process. In the dye adsorption isotherms, the Freundlich model was better suited for cotton, showing a weak interaction between fiber and curcumin, and the Langmuir model for polyamide, showing superior interaction due to curcumin and fiber having opposite polarities. The thermodynamic parameters indicate that interactions between curcumin and fibers are not spontaneous for cotton, assuming an endothermic and spontaneous process. For the polyamide fiber, an exothermic process was observed, showing again the different behavior of the fibers in the curcumin adsorption process. Through the FTIR analysis, alterations were observed in the dyed polyamide fiber, suggesting the existence of chemical interactions, and the microscopic analysis did not indicate morphological alterations on the fiber surface. The tests of fastness to washing, friction and water indicated a greater resistance of the color for the polyamide, mainly in humid environment. On the other hand, the light fastness tests showed low color resistance for both fibers. The curcumin desorption tests with the dyed fabrics showed better results in a 100% ethanol solution, but with a total release of only 0.88% and 0.97% for polyamide and cotton, respectively. The desorption showed a sustained behavior for 12 hours, adapting to the mathematical model of Higuchi, which indicates a purely diffusive release process. In the antimicrobial tests, the dyed samples did not present inhibitory activities, suggesting an inefficient concentration of curcumin and influence on the extraction methodology.

**Keywords:** Turmeric. Dyeing with natural dye. Release of curcumin

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista microscópica de fibras de CO .....	20
Figura 2 – Estrutura química da celulose .....	21
Figura 3– Microscopia da fibra de poliamida .....	22
Figura 4 – Estrutura química da Poliamida 6 e da Poliamida 6.6 respectivamente .....	22
Figura 5 – Exemplo de corante ácido com cromóforo azo C.I. Azul Ácido 113 .....	25
Figura 6 – Exemplo de corante direto derivado de ftalocianina C.I. Azul Direto 86.....	25
Figura 7 – Etapas do tingimento: cinética e termodinâmica .....	29
Figura 8 – Curva de esgotamento de tingimento .....	29
Figura 9 – Curva isotérmica de Lagmuir .....	32
Figura 10 – Curva isotérmica de Freundlich .....	34
Figura 11 – Curva isotérmica de Nernst.....	35
Figura 12 – Espaço tridimensional de cores do sistema CIELAB .....	41
Figura 13 – Planta, rizomas, flor e extrato em pó da <i>Cúrcuma longa L.</i> respectivamente.....	47
Figura 14 - Estrutura química da curcumina (1, 7-bis (4-hidroxi-3-metoxifenil) -1, 6-heptadieno-3, 5-diona).....	48
Figura 15 – Quantidade de citações relacionadas com as principais atividades bioativas da cúrcuma longa levantada pelo Ministério da Saúde em 2015 .....	49
Figura 16 – Principais aplicações etnofarmacológicas descritos para os rizomas da <i>Cúrcuma longa</i> .....	50
Figura 17 – Diagrama do processo de preparação da fibra de algodão e poliamida .....	58
Figura 18 – Curva de tingimento.....	60
Figura 19 – Espectro eletrônico de absorção no UV-Vis do extrato de cúrcuma em água ( $35 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) e etanol ( $20 \mu\text{g mL}^{-1}$ ) com absorbância máxima em $\lambda = 425 \text{ nm}$ .....	67
Figura 20 – Efeito da concentração do extrato da cúrcuma na força colorística (K/S).....	71
na fibra de algodão e poliamida.....	71
Figura 21 – Efeito do tempo de contato na adsorção do extrato da cúrcuma na fibra .....	73
de algodão e poliamida respectivamente (0-20 min).....	73
Figura 22 – Efeito do tempo de contato na adsorção do extrato da cúrcuma na fibra .....	73
de algodão e poliamida respectivamente (0-50 min.).....	73
Figura 23 – Ajuste linear das cinéticas de adsorção de Pseudo-primeira ordem para a fibra de algodão (a) e poliamida (b), e Pseudo-segunda ordem para a fibra de algodão (c) e poliamida (d) obtidas pelo tingimento com o extrato da cúrcuma .....	75

Figura 24 – Isotermas de adsorção não linear do modelo de Freundlich (a) e Lagmuir (b) para a fibra de algodão .....	80
Figura 25 – Isotermas de adsorção não linear do modelo de Freundlich (a) e Lagmuir (b) para a fibra de poliamida .....	81
Figura 26 – Determinação da constante de equilíbrio termodinâmica do algodão nas temperaturas de 60 °C (a), 80 °C (b) e 100 °C (c).....	82
Figura 27 – Determinação da constante de equilíbrio termodinâmica da poliamida nas temperaturas de 60°C (a), 80°C (b) e 100°C (c).....	83
Figura 28 – Valores de $\ln K_C$ versus $1.T^{-1}$ para determinação dos parâmetros termodinâmicos do algodão (a) e poliamida (b).....	84
Figura 29 – Resultado da análise FTIR nas amostras de algodão alvejado e tingido.....	87
Figura 30 – Resultado da Análise FTIR nas amostras de poliamida alvejada e tingida.....	88
Figura 31 – Micrografias da amostra de algodão alvejada (a, c, e), amostra de algodão tingida com o extrato da cúrcuma (b, d, f) em ampliação de 100x (a – b), ampliação de 500x (c – d), ampliação de 1000x (e – f) .....	89
Figura 32 – Micrografias da amostra de poliamida alvejada (a, c, e), amostra de poliamida tingida com o extrato da cúrcuma (b, d, f) em ampliação de 100x (a – b), ampliação de 500x (c – d), ampliação de 1000x (e – f).....	91
Figura 33 – Amostras de algodão e poliamida antes e depois do ensaio de solidez à lavagem demonstrando elevado grau de alteração de cor. ....	93
Figura 34 – Cinética de liberação da curcumina da fibra de poliamida em 50, 75 e 100% de proporção de etanol .....	97
Figura 35 – Curva $\ln(M_t/M_\infty)$ versus $\ln(t)$ para a poliamida submersa em 50% (a), 75% (b) e 100% (c) de etanol.....	98
Figura 36 – Curva $M_t/M_\infty$ versus $\sqrt{t}$ para a para a poliamida submersa em 50% (a), 75% (b) e 100% (c) de etanol.....	100
Figura 37 – Curva $M_t/M_\infty$ versus $t$ para a para a poliamida submersa em 50% (a), 75% (b) e 100% (c) de etanol. Valores experimentais (●) e modelo (—).....	102
Figura 38 – Efeito antimicrobiano dos tecidos de algodão e poliamida alvejados e tingidos com extrato de cúrcuma contra <i>E. coli</i> .....	105
Figura 39 – Efeito antimicrobiano dos tecidos de algodão e poliamida alvejados e tingidos com extrato de cúrcuma contra <i>S. aureus</i> .....	106

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais classes, características e aplicações dos corantes têxteis.....	23
Quadro 2 – Equipamentos e <i>software</i> utilizados nas análises e nos experimentos com a cúrcuma .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aditivos químicos utilizados no processo de pré-alveamento em fibra de algodão e poliamida .....	58
Tabela 2 – Variáveis do tingimento com o extrato da cúrcuma para o algodão e poliamida...	60
Tabela 3 – Concentração de curcumina obtida pelo método de repouso em etanol com 1 g, 3 g e 5 g de cúrcuma no decorrer de 7 dias .....	68
Tabela 4 – Concentração de curcumina obtida pelo método de extração com agitação à 60 °C em etanol com 1 g, 3 g e 5 g de cúrcuma em 30 e 60 min .....	68
Tabela 5 – Percentual de esgotamento e massa de curcumina em mg por grama de fibra de algodão e poliamida em diferentes concentrações de solução corante (100, 150 e 200% s.p.m.) .....	70
Tabela 6– Coordenadas de cor e cor da fibra de algodão e poliamida tingidas .....	71
com extrato de cúrcuma.....	71
Tabela 7 – Comparação dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para a cinética do tingimento do algodão e poliamida com o extrato da cúrcuma.....	76
Tabela 8 – Parâmetros dos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich para o tingimento da fibra de algodão com o extrato da cúrcuma .....	77
Tabela 9 – Parâmetros dos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich para o tingimento da fibra de poliamida com o extrato da cúrcuma.....	77
Tabela 10 – Parâmetros termodinâmicos para a adsorção do extrato da cúrcuma no algodão	84
Tabela 11 – Parâmetros termodinâmicos para a adsorção do extrato da cúrcuma na poliamida . .....	84
Tabela 12 – Solidez da cor à lavagem dos tecidos de algodão e poliamida tingidos com o corante extraído da cúrcuma.....	93
Tabela 13 – Solidez da cor à fricção dos tecidos de algodão e poliamida tingidos com o corante extraído da cúrcuma.....	94
Tabela 14 – Solidez da cor à fricção dos tecidos de algodão e poliamida tingidos com o corante extraído da cúrcuma.....	95
Tabela 15 – Expoente difusional ( $n$ ) e constante difusional ( $k$ ) da liberação de curcumina a partir da poliamida em proporção de 50, 75 e 100% de etanol.....	99

Tabela 16 – Coeficiente de difusão (D) e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para os ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da liberação de curcumina da poliamida tingida com extrato de cúrcuma em meio de diferente proporção de etanol.....	103
Tabela 17 – Percentual de aumento e redução das bactérias E. coli e S. aureus nos tecidos de algodão e poliamida alvejados e tingidos com extrato de cúrcuma .....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AATCC	Associação Americana de Químicos e Coloristas Têxteis
ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
CI	Índice Internacional de Cores
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CO	Algodão
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FISPQ	Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
ISO	Organização Internacional de Normalização
JIS	Padrões Industriais Japoneses
K/S	Força Colorística
LABENE	Laboratório de Beneficiamento
LABMAN	Laboratório do Meio Ambiente
LTE	Laboratório de Análise Térmica e Espectroscopia
MS	Ministério da Saúde
PA	Poliamida
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	INDÚSTRIA TÊXTIL.....	18
2.2	FIBRAS TÊXTEIS: ALGODÃO E POLIAMIDA .....	19
2.3	CORANTES E ADITIVOS TÊXTEIS.....	23
2.4	BENEFICIAMENTO TÊXTIL .....	26
2.5	TINGIMENTO .....	27
<b>2.5.1</b>	<b>Cinética e termodinâmica do processo de tingimento .....</b>	<b>28</b>
2.5.1.1	Cinética de tingimento.....	29
2.5.1.2	Equilíbrio de tingimento.....	31
2.5.1.2.1	<i>Isotermas de adsorção .....</i>	<i>32</i>
2.5.1.3	Parâmetros termodinâmicos.....	35
2.6	SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA TÊXTIL.....	37
<b>2.6.1</b>	<b>Corantes naturais.....</b>	<b>38</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Colorimetria .....</b>	<b>40</b>
2.7	TÊXTEIS FUNCIONAIS.....	41
2.8	EFEITO ANTIMICROBIANO EM TÊXTEIS .....	42
2.9	LIBERAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS ATIVAS .....	44
2.10	<i>CÚRCUMA LONGA L.....</i>	<i>47</i>
2.11	ESTADO DA ARTE .....	51
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
3.1	MATERIAIS.....	56
<b>3.1.1</b>	<b>Cúrcuma .....</b>	<b>56</b>

3.1.2	<b>Substrato têxtil.....</b>	<b>56</b>
3.1.3	<b>Reagentes químicos.....</b>	<b>57</b>
3.1.4	<b>Equipamentos e <i>software</i> utilizados .....</b>	<b>57</b>
3.2	<b>MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
3.2.1	<b>Preparação das amostras .....</b>	<b>57</b>
3.2.2	<b>Varredura de absorção molecular na região UV/Visível .....</b>	<b>59</b>
3.2.3	<b>Preparação da solução corante.....</b>	<b>59</b>
3.2.4	<b>Curva padrão de calibração .....</b>	<b>59</b>
3.2.5	<b>Processo de tingimento .....</b>	<b>60</b>
3.2.6	<b>Avaliação de cor .....</b>	<b>61</b>
3.2.7	<b>Determinação da cinética de adsorção e isothermas de tingimento .....</b>	<b>61</b>
3.2.8	<b>Determinação de parâmetros termodinâmicos .....</b>	<b>62</b>
3.2.9	<b>Espectroscopia no Infravermelho por Transferência de Fourier (FTIR) .....</b>	<b>63</b>
3.2.10	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura(MEV) .....</b>	<b>63</b>
3.2.11	<b>Determinação da solidez.....</b>	<b>63</b>
3.2.12	<b>Ensaio de liberação da curcumina .....</b>	<b>64</b>
3.2.12.1	Modelagem matemática do processo difusivo da curcumina dos substratos têxteis. 65	
3.2.13	<b>Ensaio antimicrobiano .....</b>	<b>65</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>66</b>
4.1	<b>PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>66</b>
4.2	<b>VARREDURA DE ABSORÇÃO MOLECULAR NA REGIÃO UV/VISÍVEL .</b>	<b>67</b>
4.3	<b>SOLUÇÃO CORANTE OBTIDO PELA CÚRCUMA .....</b>	<b>67</b>
4.4	<b>DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CURCUMINA .....</b>	<b>69</b>
4.5	<b>PROCESSO DE TINGIMENTO.....</b>	<b>69</b>
4.5.1	<b>Cinética de Adsorção .....</b>	<b>72</b>
4.5.2	<b>Isotermas de adsorção .....</b>	<b>76</b>

<b>4.5.3</b>	<b>Parâmetros termodinâmicos.....</b>	<b>82</b>
4.6	CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO POR ESPECTROFOTOMETRIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	86
4.7	CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	89
4.8	TESTES DE SOLIDEZ .....	92
<b>4.8.1</b>	<b>Solidez à lavagem.....</b>	<b>92</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Solidez à fricção .....</b>	<b>94</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Solidez à água.....</b>	<b>95</b>
<b>4.8.4</b>	<b>Solidez à luz.....</b>	<b>95</b>
4.9	ENSAIO DE LIBERAÇÃO DA CURCUMINA EM ETANOL .....	96
4.10	ENSAIO ANTIMICROBIANO .....	105
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>108</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>110</b>
	<b>ANEXO A – Certificado de análise da curcumina .....</b>	<b>130</b>
	<b>APÊNDICE A – Curva de calibração da curcumina em etanol, cúrcuma em etanol, e solução de tingimento 10% (v/v) respectivamente .....</b>	<b>131</b>
	<b>APÊNDICE B – Resultado da Análise FTIR do algodão e poliamida tingidos e curcumina .....</b>	<b>132</b>
	<b>APÊNDICE C – Resultado da Análise por FTIR de malha de poliamida alvejada e tingida com extrato de cúrcuma.....</b>	<b>133</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cor sempre foi um dos parâmetros mais importantes e atrativos para os diferentes produtos têxteis, e por muitos séculos, os materiais têxteis eram tingidos exclusivamente com corantes naturais. Entretanto, a partir do século XIX, os corantes naturais passaram a ser substituídos por corantes sintéticos, devido a maior qualidade de tingimento proporcionada, quando comparado aos corantes naturais utilizados na época (UMBREEN *et al.*, 2008; KANT, 2012). A aplicação de corantes sintéticos trouxe para a indústria têxtil benefícios relacionados com o desenvolvimento e reprodutibilidade de cores, bem como melhorias de solidez, além de impulsionar o desenvolvimento de máquinas eficientes e, conseqüentemente, melhorias nas plantas industriais (MENEGAZZO, 2014). No entanto, de acordo com Velmurugan e Tamilselvi (2013), a utilização de corantes sintéticos contribui para que a indústria têxtil seja considerada uma das indústrias mais poluentes do planeta.

Muitos dos corantes sintéticos e produtos químicos utilizados na indústria têxtil, em sua maioria na etapa de beneficiamento, possuem substâncias tóxicas e de estrutura química complexa, e a grande quantidade de resíduos gerados dificulta o tratamento de efluentes devido à baixa capacidade de biodegradação destes produtos (PEIXOTO *et al.*, 2013; RODRIGUES, 2013). Aliar sustentabilidade, tecnologia e inovação tornou-se um dos principais desafios da atual indústria têxtil, o que tem despertado um crescente interesse no uso de corantes naturais para o tingimento têxtil, principalmente por apresentarem melhor biodegradabilidade e serem considerados ambientalmente amigáveis (COPINI, 2018; NARIMATSU *et al.*, 2020).

A introdução de corantes naturais nos processos modernos de tingimento tem surgido como alternativa aos métodos convencionais de tingimento e pode ser vista como uma etapa de desenvolvimento contínuo das técnicas de beneficiamento têxtil, visando à redução da quantidade de produtos químicos e na qualidade do efluente gerado (NARIMATSU *et al.*, 2020). Apesar da predominância de corantes sintéticos nos últimos anos ter impedido o desenvolvimento e a adaptação do tingimento com corante natural para novas exigências das tinturarias modernas, o uso de corante natural para o tingimento têxtil é considerado uma alternativa adequada por apresentar características biodegradáveis, ausência de toxicidade, e disponibilidade em várias fontes naturais renováveis (MENEGAZZO, 2014; DA SILVA, 2016).

A busca por conhecimento e aperfeiçoamento das técnicas de tingimento com corantes naturais tornou-se de grande interesse entre os pesquisadores reforçando as potencialidades

existentes. Em geral, as pesquisas aplicadas ao tingimento com corante natural vêm sendo realizadas para um melhor entendimento dos mecanismos envolvidos em diferentes condições do tingimento (HASAN *et al.*, 2014; GONÇALVES, 2020). Conforme pesquisas na base de dados Scopus, no período de 2010 a 2021 a quantidade de documentos científicos sobre tingimento com corantes naturais em têxteis aumentou 382%. Apesar do desenvolvimento importante já alcançado, novas pesquisas são fundamentais para permitir melhor compreensão dos mecanismos envolvidos, e por conseqüência, uma melhora nos processos sob o ponto de vista a contribuir também com a redução dos impactos ambientais negativos gerados.

A cúrcuma (*Curcuma longa L.*) é um dos mais antigos corantes naturais usados em todo o mundo e é principalmente valorizada pelo seu principal componente, a curcumina, que confere a cor amarela às fibras têxteis e aos alimentos (SACHAN; KAPOOR, 2007). Devido a sua baixa toxicidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade e alta disponibilidade, a cúrcuma é adequada para a tecnologia de tingimento de tecidos desde a antiguidade (VENKATASUBBU; ANUSUYA, 2017). Entretanto, por possuir várias propriedades bioativas, como antioxidante, antimicrobiana, anti-inflamatória e cicatrizante, estas características associadas possibilitam estender sua utilização em mercados de perfumaria, condimental e até mesmo medicinal (NETTO, 2009).

Segundo Costa (2018), os têxteis funcionais, ou seja, têxteis que para além das suas características normais fornece propriedades funcionais, são uma área de interesse crescente para aplicações em diversos setores como cosmética, farmacêutica e médica, fazendo-se importante o encontro de soluções tecnologicamente avançadas e ambientalmente sustentáveis. Assim, considerando o potencial químico, biológico e farmacológico de muitas plantas, o desenvolvimento de têxteis funcionais com compostos naturais é altamente promissor, assim como é crescente o estudo de sistemas de liberação destes ativos de forma sustentada.

O estudo do perfil de liberação de um composto ativo a partir de materiais têxteis, sistema este comumente usado para prolongar a dose terapêutica de uma dose única e para eliminar ou minimizar as concentrações que excedem os requisitos terapêuticos, se faz necessário para entender o seu comportamento e o mecanismo pelo qual a liberação ocorre (MARTÍ, 2021). E para melhor compreender e avaliar a liberação de ativos, diversos modelos matemáticos são utilizados para estudos de sistema de liberação.

Por fim, a potencialidade do tingimento com corante natural como forma de valorização das águas residuais da indústria têxtil assim como o desenvolvimento de um sistema de liberação de princípios ativos para possível futura aplicação na área da saúde e bem-estar, foram

aspectos motivadores para a realização do presente trabalho. A existência do segundo maior pólo industrial têxtil brasileiro, na região do Vale do Itajaí, em Santa Catarina, e a crescente quantidade de pesquisas relatadas na literatura também incentivaram a realização deste tema de pesquisa.

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são descritos a seguir.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial tintorial do extrato da cúrcuma sobre as fibras de algodão e de poliamida, seu mecanismo de adsorção, e a liberação de seus princípios ativos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Determinar a metodologia de extração da curcumina;
- b) Definir as condições de tingimento variando a concentração de corante;
- c) Estudar a cinética de tingimento com o extrato da cúrcuma e compreender os seus mecanismos por meio das isotermas de adsorção e parâmetros termodinâmicos;
- d) Estudar a cinética de liberação *in vitro* da curcumina a partir das fibras em etanol, e os coeficientes de difusão;
- e) Avaliar a fixação do corante sobre as fibras por meio de ensaios de solidez à lavagem, fricção, água e luz;
- f) Analisar a morfologia e as possíveis interações químicas das amostras tingidas;
- g) Avaliar a atividade antimicrobiana *in vitro* das fibras tingidas.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica sobre a indústria têxtil, as fibras de algodão (CO) e poliamida (PA), e o processo de tingimento, assim como os corantes naturais como a cúrcuma e seus efeitos colorísticos e terapêuticos, e têxteis funcionais para liberação de ativos. No Capítulo 3 são

apresentados os materiais, equipamentos e procedimentos que foram utilizados neste trabalho. Os resultados obtidos nesta pesquisa são apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais relacionadas à pesquisa.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica composta por uma visão geral sobre a indústria têxtil: fibras e sustentabilidade associada à produção têxtil; processos de beneficiamento têxtil: corantes sintéticos, naturais e produtos químicos auxiliares, e colorimetria. São apresentados também os têxteis funcionais com liberação de ativos, assim como elementos naturais terapêuticos como a cúrcuma e seus efeitos antimicrobianos em materiais têxteis. O capítulo termina com a apresentação do estado da arte da aplicação da cúrcuma como um agente colorístico têxtil e terapêutico, descrevendo os trabalhos reportados na literatura que investigaram a cúrcuma como um composto potencial para diversas aplicações.

### **2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL**

Em relação ao desenvolvimento humano, a indústria têxtil é uma das mais antigas e representativas na indústria de transformação. Passando constantemente por mudanças, o setor têxtil busca sempre atender as demandas globais do mercado, tanto no que diz respeito à qualidade, quanto em termos de tempo e economia durante o processo produtivo (GORINI; SIQUEIRA, 2002; FCEM, 2019a).

A cadeia produtiva têxtil se inicia pela manufatura de fibras (naturais, sintéticas e artificiais) e posteriormente passa pelo processo de formação do fio (fiação); formação do substrato têxtil por processos de tecelagem, malharia, ou não-tecidos; beneficiamento, responsável pela preparação, tingimento e acabamento do substrato; e confecção para chegar ao produto final (DIAS, 1999; ANDRADE; BEZERRA; LANDIM, 2015).

O produto final têxtil ainda é dividido em dois segmentos principais relacionados à sua aplicação, sendo eles para fins convencionais (vestuário, linhas lar e decoração) e para fins específicos, denominados têxteis técnicos (têxteis automotivos, médicos, engenharia civil, esportivos e de alto desempenho). Apesar de complexa, a cadeia têxtil possibilita diversas ramificações e a criação de produtos diversificados influenciando costumes e tendências.

Há quase 200 anos no Brasil, a indústria têxtil teve forte influência na evolução dos meios de produção e também na economia nacional. A importância desta indústria no Brasil pode ser comprovada por números. Dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e da Confecção (ABIT) apontam que o país é a maior cadeia têxtil completa do Ocidente, sendo o quarto maior produtor de malhas e o quinto maior produtor e consumidor de denim. A indústria têxtil brasileira ocupa a segunda colocação no ranking como gerador de empregos e empregador na indústria de transformação e é referência mundial em moda praia, jeans e têxteis lar (ABIT, 2022; FCEM, 2019b).

No Brasil, destacam-se os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina e Ceará como fortes produtores de têxteis. O estado de Santa Catarina, segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI) (2021), é considerado o maior produtor de vestuário do país. Em 2018, estimou-se que a região era detentora de 26,75% da produção nacional de vestuário e acessórios, com faturamento estimado em R\$ 6,6 bilhões, superando o estado de São Paulo com R\$ 5,5 bilhões (22,57%) após 10 anos (CNI, 2021).

O sucesso do setor no estado de Santa Catarina deve-se fortemente a fatores históricos que favoreceram o desenvolvimento econômico e social, possibilitando um espaço fértil para seu crescimento. Além de ser visto como um forte produtor de têxteis, o estado também é referência internacional de qualidade e boa produtividade (FCEM, 2020a).

Apesar da grande representatividade regional e nacional, a indústria têxtil acumula grandes responsabilidades ambientais, econômicas e sociais. Justamente por conta dos dados apresentados que o setor procura conservar e reutilizar os recursos empregados em razão do conjunto de etapas que caracterizam a indústria potencialmente poluente (CERQUEIRA; RUSSO; MARQUES, 2009). Entretanto, com o desenvolvimento constante de novas tecnologias, as possibilidades para a indústria têxtil se multiplicam. A cada dia surgem novas tendências, novas maneiras de otimizar a produção e potencializar os resultados para este segmento que vive em transformação.

## 2.2 FIBRAS TÊXTEIS: ALGODÃO E POLIAMIDA

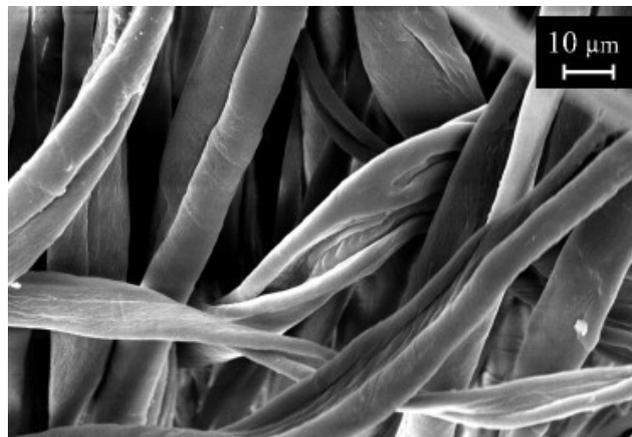
Classificadas como de origem natural e manufaturadas, as fibras têxteis são os principais insumos para a formação dos materiais têxteis, apresentando propriedades e características únicas de acordo com a estrutura molecular e forma de obtenção. Entretanto, quando

empregadas na produção de têxteis, as fibras são escolhidas de acordo com as propriedades finais requeridas para o produto (KUASNE, 2008; SILVA, 2019).

A fibra de algodão (CO) é uma fibra natural de origem vegetal e uma das principais matérias-primas utilizadas no setor têxtil (ALCÂNTARA; DALTIM, 1996). Encontrada em vestimentas de achados arqueológicos no Egito, estima-se que o algodão possa ter sido usado desde 12000 a.C., antes mesmo de o linho ser descoberto (DOCHIA, 2012). Ainda assim, a fibra de algodão é a fibra mais consumida no mundo e, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2020), o Brasil ocupa o quinto lugar entre os países que mais produzem algodão e segundo maior exportador, movimentando cerca de 20% do mercado mundial do algodão.

A fibra de algodão possui uma estrutura multicamada, com aspecto morfológico irregular, torcido e achatado, como apresenta a Figura 1. Essas irregularidades, chamadas de convoluções, proporcionam um aumento de fricção interna e permite aos fios, uma excelente resistência à tração ao serem fiados (DOCHIA, 2012).

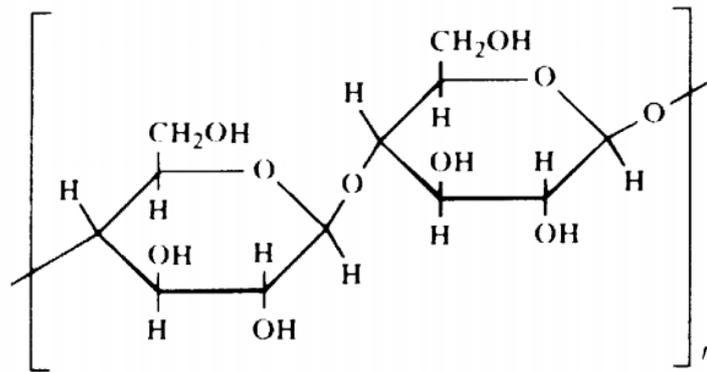
Figura 1 – Vista microscópica de fibras de CO



Fonte: VARESANO *et al.* (2009)

O algodão é constituído por aproximadamente 90% de celulose, a qual confere maior resistência às fibras devido ao alto grau de polimerização e orientação molecular. Em menores quantidades, encontram-se ceras, pigmentos naturais, gorduras, pectinas, sais minerais, e outros (SALEM, 2010; SCHREIBER, 2019). Na Figura 2 é apresentada a estrutura química da cadeia de celulose.

Figura 2 – Estrutura química da celulose



Fonte: CARVALHO *et al.*(2000)

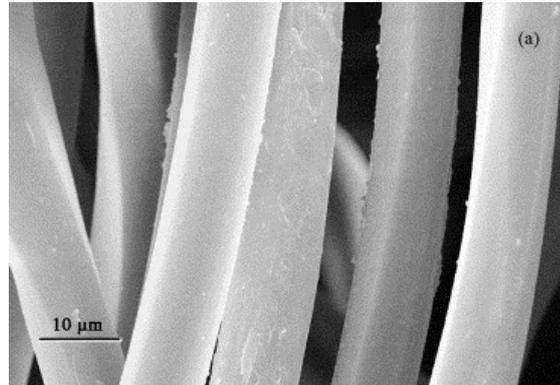
Por possuir características de conforto, ótima solidez a lavagem, durabilidade, grande poder de absorção e baixo custo, a fibra de algodão é aplicada nas mais diversas áreas, não apenas para produção de tecidos como vestuário e têxteis lar, mas também na indústria de produtos hospitalares, automobilísticos, de higiene e segurança (ALTMAN *et al.*, 1995; ALCÂNTARA; DALTIM, 1996; FCEM, 2018).

Em relação às fibras manufaturadas, a criação das fibras sintéticas é considerada uma das revoluções mais significantes no mundo da moda, pois trouxeram consigo, fibras com maior durabilidade, elasticidade, praticidade, novas possibilidades de design e cores mais vivas. Entre as fibras sintéticas mais conhecidas no mercado, está a poliamida, juntamente com o poliéster e elastano (FCEM, 2019d).

Desenvolvida em 1935 pelo químico Wallace H. Carothers, a poliamida (PA) é uma fibra sintética que proporciona um toque agradável, elasticidade e leveza, sendo amplamente utilizada na fabricação de artigos de moda íntima, praia e esportiva. Além disso, a poliamida apresenta boa resistência a abrasão, elevados níveis de tensão e flexão, secagem rápida e boa estabilidade dimensional, estendendo sua utilização em aplicações técnicas mais exigentes, como automobilístico, revestimentos e reforços industriais (BASSANI *et al.*, 2002; MATHER; WARDMAN, 2015; FCEM, 2019d).

Na Figura 3 é apresentado o aspecto microscópico da fibra de poliamida com sua estrutura uniforme e homogênea, caracterizada pelo seu processo de obtenção.

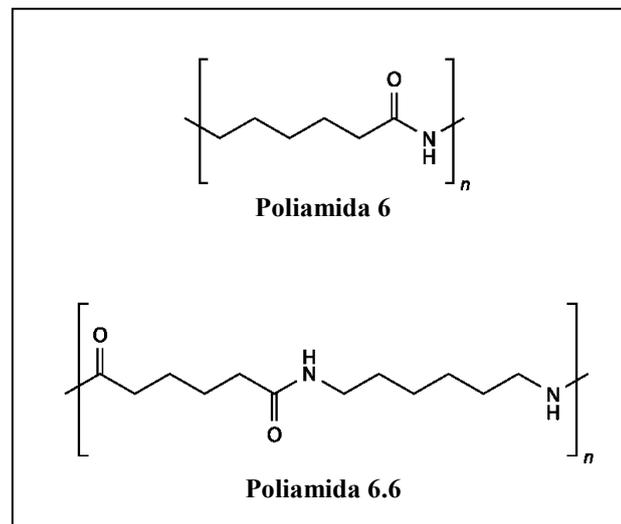
Figura 3– Microscopia da fibra de poliamida



Fonte: DAOUD *et al.* (2005)

Dentre as diversas fibras poliamídicas existentes, destacam-se a Poliamida 6, produto da polimerização do  $\epsilon$ -caprolactama e que é objeto deste estudo, e a Poliamida 6.6, produzida pela reação por condensação do ácido adípico com hexametilenodiamina. Na Figura 4 são apresentadas as estruturas químicas das poliamidas 6 e 6.6, as quais apresentam grupos terminais amínicos e carboxílicos, e são largamente utilizadas na indústria têxtil (PAINTER *et al.*, 1996; SALEM, 2010).

Figura 4 – Estrutura química da Poliamida 6 e da Poliamida 6.6 respectivamente



Fonte: Adaptado de Salem (2010)

Na maioria dos casos, para a fabricação de tecidos de poliamida, utiliza-se a fibra de elastano em menor percentual devido a uma série de vantagens que proporciona ao tecido, como

o aumento da durabilidade e garantia de elasticidade, além da resistência ao tempo, uma vez que possui maior resistência a produtos cosméticos e químicos, e oxidação (FCEM, 2019d).

### 2.3 CORANTES E ADITIVOS TÊXTEIS

De acordo com Salem (2010), corantes são matérias-primas coloridas, solúveis ou pouco solúveis em água, e que durante o processo de tingimento são adsorvidos e difundidos para o interior da fibra por meio de interações físico-químicas.

Cada classe de corante possui uma estrutura química bem definida e uma forma particular de ligação com a fibra. E segundo Clark (2011), os corantes podem ser classificados de modo geral pela sua origem, estrutura e aplicação. O Quadro 1 apresenta as classes de corantes têxteis, assim como suas principais características e aplicações.

Quadro 1 – Principais classes, características e aplicações dos corantes têxteis

(continua)

<b>Classificação</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicação</b>
Reativo	Forma ligações covalentes com as fibras celulósicas e de poliamida. Possui alta solubilidade em água e boa resistência à luz solar.	Fibras celulósicas e sintéticas.
Direto	Solúvel em água, tingem tecidos celulósicos via interações Van Der Waals. O uso de eletrólitos aumenta a afinidade do corante. Também chamado de corante substantivo, é muito utilizado por ser de fácil aplicação.	Viscose, algodão, outras.
Azóico	Insolúveis em água. Proporciona alta resistência a luz e umidade, e brilho. Não é muito utilizado por ser considerado tóxico e por possuir uma gama limitada de cores.	Fibras celulósicas.

Fonte: Adaptado de Guaratini; Zanoni (2000); Mahapatra (2016)

(conclusão)

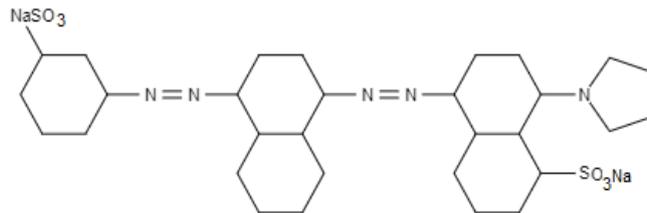
<b>Classificação</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicação</b>
Ácido	São sais de sódio, solúveis em água, se liga à fibra por uma troca iônica. Fornece uma ampla gama de cores. Apresenta boa solidez à luz, água do mar e cloro.	Fibras proteicas como lã e seda. Também, a poliamida.
Disperso	Insolúvel em água, interage com as fibras por forças Van Der Waals. São solubilizados em alta temperatura e aplicados em fibras hidrofóbicas. Garante uma boa solidez.	Fibras sintéticas como acetato, poliamida, poliéster, e em alguns casos fibras celulósicas.
À tina	Insolúveis em água. Durante o tingimento, em solução alcalina, transforma-se em forma solúvel. Possui boa fixação à fibra.	Algodão.
Enxofre	Complexos orgânicos que contém enxofre. Insolúveis em água, são solubilizados mediante elementos redutores, como sulfureto de sódio. Usado em cores escuras, são de baixo custo e proporcionam elevada solidez.	Fibras celulósicas.
Catiônico	Normalmente são hidrocloreídricos ou sais de base orgânica. Possui um grupamento amino NH <sub>2</sub> . Também chamado de corante básico. Proporciona brilho e cores intensas.	Fibras acrílicas, lã, seda e acetato de celulose.
Mordente	Não possui afinidade natural com têxteis e necessita de auxiliar (mordente) para se fixar, como sais de cromo, cobre ou ferro. Também são chamados de corantes metálicos.	Fibras celulósicas.

Fonte: Adaptado de Guaratini; Zanoni (2000); Mahapatra (2016)

Para a identificação dos corantes, o Índice Internacional de Cores, mais conhecido como *Colour Index International* (CI) classifica os corantes e pigmentos de acordo com sua estrutura, relativa ao principal grupo químico presente (grupo azo, antraquinona, ftalocianina, triarilmetano e outros), mas também com sua aplicação tintorial, facilitando a identificação de

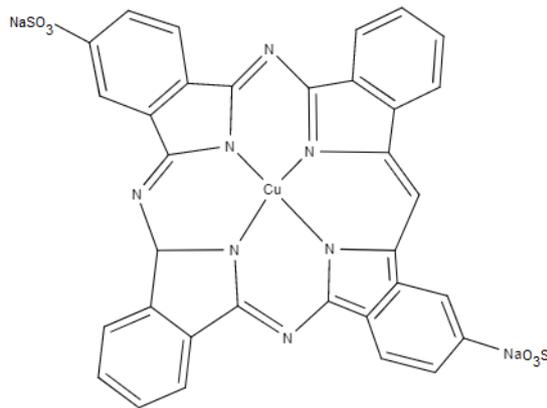
um determinado corante para determinada fibra (ácido, azóico, básico, direto, disperso, reativo, enxofre e à tina) (ZANONI; YAMANAKA, 2016). Na Figura 5 é apresentado um exemplo de corante ácido com grupo cromóforo azo ( $N=N$ ) e na Figura 6 um corante direto derivado do grupo ftalocianina ( $C_{32}H_{18}N_8$ ).

Figura 5 – Exemplo de corante ácido com cromóforo azo C.I. Azul Ácido 113



Fonte: Adaptado de Salem (2010)

Figura 6 – Exemplo de corante direto derivado de ftalocianina C.I. Azul Direto 86



Fonte: Adaptado de Salem (2010)

Algumas propriedades ressaltadas por Salem (2010), como importantes para os corantes, incluem cor intensa, afinidade com a fibra, solubilidade permanente ou temporária e solidez.

Além dos corantes, diversos produtos químicos são adicionados aos processos de beneficiamento. Para o processo de preparação, são empregados produtos químicos auxiliares que proporcionarão limpeza às fibras e as prepararão para receber os corantes. Outros produtos auxiliam no transporte do corante para a fibra e na fixação destes na mesma. Para a preparação do algodão, por exemplo, os principais produtos químicos auxiliares empregados são:

detergentes e umectantes, dispersantes, sequestrantes, ácidos, álcalis, eletrólitos, redutores, oxidantes, entre outros (PICCOLI, 2008).

Uma percepção crescente de que os corantes e produtos químicos auxiliares utilizados no beneficiamento são perigosos para a saúde humana, bem como para o meio ambiente despertou o interesse por processos eco-amigáveis (SAMANTA; KONAR, 2011).

## 2.4 BENEFICIAMENTO TÊXTIL

O termo Beneficiamento Têxtil refere-se a métodos empregados durante o processamento têxtil que tem como objetivo transformar substratos têxteis crus em materiais brancos, tingidos, estampados e acabados (FORGIARINI, 2006), alterando toque, cor, resistência, capacidade de absorção de água e outras características. A etapa de beneficiamento pode ser dividida em três fases: primária, secundária e terciária. Para se atingir resultados desejados, variadas combinações são possíveis.

O beneficiamento primário, conhecido como processo de preparação, consiste na remoção das impurezas do substrato por meio de processos mecânicos, físicos, químicos, bioquímicos e físico-químicos como escovagem, chamuscagem, desengomagem, mercerização, purga e outros (VIGO, 1994). Destacam-se ainda processos que fornecem coloração mais branca ao material, como pré-alveamento, alveamento ou branqueamento ótico. O processamento aplicado bem como suas condições varia de acordo com a matéria-prima e aplicações finais do substrato.

Para garantir qualidade às fibras de algodão nos processos posteriores, deve-se remover nesta etapa primária todo o material não celulósico, tais como óleos, proteínas, pectinas e outras impurezas. Rouette (2001) afirma que a limpeza do substrato é um fator importante para assegurar a absorção de corantes durante o tingimento, aumentando na maioria dos casos, o rendimento da cor. Sendo assim, a primeira etapa do beneficiamento deve ser realizada de forma adequada, garantindo aspecto limpo e hidrófilo de forma a proporcionar um tingimento equalizado e reproduzível.

Caracterizada pela etapa de tingimento e estamparia, o beneficiamento secundário confere cor, diferente da coloração original, de modo a produzir artigos diferenciados. Os produtos que provocam essas modificações são os corantes, pigmentos, produtos químicos auxiliares e equipamentos adequados para o processo.

Por último, o beneficiamento terciário é definido pelas operações de acabamento que visam melhorar as características funcionais e estéticas após a etapa de coloração. Estas operações podem ser físicas, químicas, biológicas, e/ou tecnológicas como calandragem, amaciamento, acabamentos antimicrobianos, antiestáticos, biopolimento, tratamento com plasma, nanotecnologia e outros (ALCÂNTARA; DALTIM, 1996).

## 2.5 TINGIMENTO

O interesse pela coloração de materiais pela raça humana provém dos tempos pré-históricos, demonstrado pela aplicação de corantes naturais em peles de animais e substratos têxteis. O desenvolvimento da técnica estendido por milhares de anos levou à produção de um processo de tingimento relativamente complicado (CLARK, 2011).

Tingimento é o processo de modificação físico-química do substrato que promove a percepção de cor quando a luz é refletida. Os desenvolvimentos de estudos e de novas tecnologias nesta técnica garantem o cumprimento do objetivo principal do tingimento: produzir coloração uniforme sobre o substrato mediante a aplicação de corantes (SALEM, 2010; KHATTAB; ABDELRAHMAN; REHAN, 2020).

O processo de tingimento é a interação entre um corante e uma fibra. E para obter-se qualidade do tingimento existem fatores que podem influenciar a aparência final da cor e devem ser devidamente conhecidas e controladas, como a construção física e química do substrato, pré e pós-tratamentos, corantes e aditivos químicos, maquinário, tempo, temperatura, velocidade e outros, pois fatores como a não reprodutibilidade da cor entre lotes, a heterogeneidade da cor em diferentes pontos e a baixa resistência da cor são considerados comuns no processo de tingimento e devem ser evitados (SALEM, 2010; KUHN, 2019).

Normalmente, o tingimento se faz em meio aquoso em dois métodos principais: por esgotamento e por sistema contínuo. No esgotamento, o corante se desloca do banho para a fibra pelo movimento do líquido e do substrato. Neste caso, o banho de tingimento é muitas vezes mais volumoso que o peso do substrato. Já no sistema contínuo, a solução de corante é aplicada por impregnação sobre o substrato e espremida mecanicamente (*foulardagem*). A boa equalização do tingimento pelo método contínuo depende diretamente das instalações e configurações mecânicas do maquinário (PICCOLI, 2008; KHATTAB; ABDELRAHMAN; REHAN, 2020).

O mecanismo de tingimento é complexo, pois diversos fenômenos estão envolvidos no processo. Primeiramente, o corante é dissolvido ou disperso e então difundido no banho. A aproximação do corante da superfície da fibra é efetuada pela movimentação do banho de tingimento pelo substrato, ou movendo o substrato no banho, ou ambos (ASPLAND, 1998). Após o contato com a fibra, ocorre a adsorção do corante.

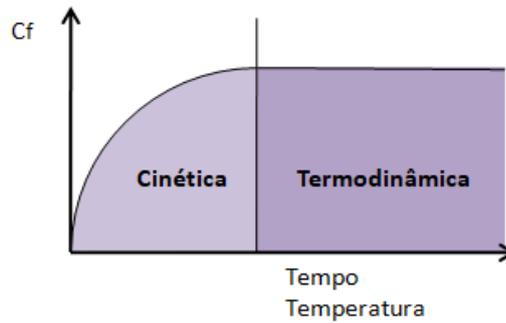
A operação de adsorção explora a habilidade do adsorvente em concentrar em sua superfície determinadas substâncias existentes em soluções líquidas, ocorrendo uma transferência de massa do tipo sólido-líquido. Quando as moléculas de um fluido são dispostas em contato com o sólido, as mesmas incidem nos pontos ativos de valências parciais, onde uma intensa força de atração entre o sólido e as moléculas do fluido provoca a sua concentração na superfície do sólido. Essa união entre o sólido adsorvente e o adsorvato pode ser tão forte de modo a apresentar características de uma reação química, entretanto, em caso de ligações fracas, o processo pode ser invertido com facilidade, liberando a substância adsorvida (GOMIDE, 1991; GIACOMINI, 2014).

A etapa posterior de difusão do corante na fibra ocorre de forma molecular, onde o corante tende a penetrar na fibra por meio das áreas amorfas por quebra e restauração das ligações, espalhando-se homogêneo e fixando-se firmemente à fibra (BELLINI, 2002). Um tempo de tingimento reduzido pode ser insuficiente para a difusão completa do corante na fibra, ocasionando assim baixo rendimento e problemas de solidez. Por outro lado, um tempo excessivo torna o processo antieconômico, além de poder resultar em uma possível degradação das fibras (ARAÚJO; CASTRO, 1986; SALEM, 2010).

### **2.5.1 Cinética e termodinâmica do processo de tingimento**

Em geral, o processo de tingimento se divide em duas etapas: cinética e termodinâmica, conforme apresentado na Figura 7. A etapa cinética refere-se à fase de montagem do corante na fibra e a termodinâmica, à etapa de fixação do corante na mesma (SALEM, 2010). Fatores como relação de banho, velocidade de vinculação com a fibra, temperatura, pH, eletrólitos e aditivos tem influência direta sobre o esgotamento do tingimento, especificamente para cada fibra e cada classe de corante.

Figura 7 – Etapas do tingimento: cinética e termodinâmica



Cf = Corante na fibra

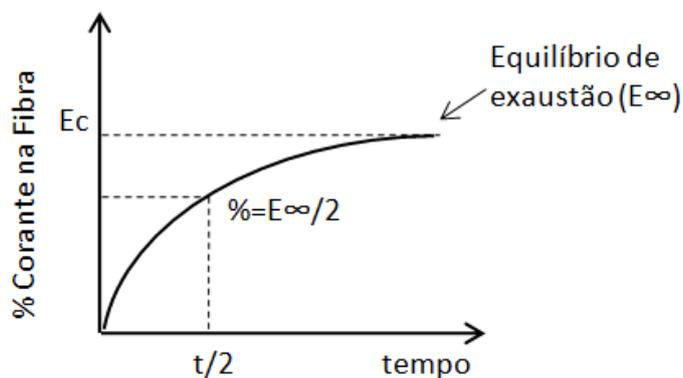
Fonte: Adaptado de Salem (2010)

### 2.5.1.1 Cinética de tingimento

Na fase cinética, ocorre a transferência do corante da solução de tingimento para a fibra, a adsorção deste na superfície da fibra e a difusão para o interior. Os estudos de cinética de adsorção avaliam o efeito do tempo nas interações entre o adsorvente e o adsorvato. Estes estudos têm como objetivo a correlação matemática dos dados experimentais, elucidando os mecanismos de adsorção envolvidos e suas hipóteses (SILVA, 2013; GIACOMINI, 2014).

É na fase cinética que ocorre a maior parte dos problemas do tingimento, sendo a velocidade de adsorção do corante pela fibra o fator determinante para um tingimento equalizado. Segundo Trotman (1970), para estabelecer toda a cinética de tingimento, constroem-se gráficos de taxa de tingimento, onde são inseridos a quantidade de corante absorvida em um eixo e o tempo em outro, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Curva de esgotamento de tingimento



Fonte: Adaptado de Trotman (1970)

A curva deve expressar o tempo de tingimento em função da porcentagem total de corante que vinculará à fibra ao atingir o equilíbrio ( $E_c$ ), tanto quanto o tempo requerido para alcançar meio esgotamento ( $E_{\infty}/2$ ) (SALEM, 2010).

Dentre os modelos cinéticos mais comumente utilizados na literatura para descrever quantitativamente o processo de adsorção na interface sólido-líquido em relação ao tempo sob condições não estabelecidas, destacam-se o modelo de pseudo-primeira ordem e o modelo de pseudo-segunda ordem (BULUT; AYDIN, 2006; SILVA, 2013; GIACOMINI, 2014).

A equação de pseudo-primeira ordem, descreve a taxa de sorção de solutos a partir de uma solução líquida, expressa conforme a Equação 1.

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad (1)$$

Ao integrar a Equação 1 para as condições de contorno  $t=0$  a  $t=t$  e  $q=0$  a  $q=q$ , e posterior rearranjo, obtém-se sua forma linearizada conforme apresentado na Equação 2.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (2)$$

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; MCKAY, 1999).

O gráfico  $\ln(q_e - q_t)$  versus  $t$  fornece uma reta em que o coeficiente angular é  $-k_1$  e o coeficiente linear é  $\ln(q_e)$ . Assim, a constante cinética ( $k_1$ ) e a massa do soluto adsorvida por grama de sólido em equilíbrio ( $q_e$ ) podem ser determinadas pelo coeficiente angular e pelo coeficiente linear, respectivamente (HO; MCKAY, 1999; AZIZIAN, 2004).

O modelo de pseudo-segunda ordem prediz o comportamento cinético de todo o processo de adsorção e considera a reação do adsorvato no sítio ativo do adsorvente por meio da quimissorção como sendo uma etapa determinante da taxa de adsorção, e a lei de velocidade para este sistema é expressa pela Equação 3 (HO; MCKAY, 1999).

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (3)$$

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 4.

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

O gráfico  $t/q$  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; MCKAY, 1999; AZIZIAN, 2004).

#### 2.5.1.2 Equilíbrio de tingimento

Durante o tingimento, as moléculas do corante permanecem em constante movimentação, algumas delas são adsorvidas e difundidas à fibra e outras moléculas retornam ao banho. A quantidade de moléculas do corante na fibra aumenta com o aumento do tempo até que a quantidade de moléculas que entra e sai da fibra seja equivalente. Quando isto ocorre, pode-se dizer que o tingimento entrou em equilíbrio e que o banho está esgotado, ou seja, mesmo que haja um tempo adicional do banho de tingimento, a quantidade de corante na fibra não será alterada (SALEM, 2010; KHATTAB; ABDELRAHMAN; REHAN, 2020).

Os termos exaustão e esgotamento são utilizados no tingimento têxtil para expressar a quantidade de corante transportado do banho para a fibra (PERKINS, 1996). A quantidade de corante não fixado pode ser resultado de diversos fatores como, por exemplo, a falta de afinidade da molécula do corante para com a fibra, acarretando em um aumento de custos e da quantidade de corante nas águas residuais, que por consequência deve ser posteriormente removido no tratamento de efluentes. Neste sentido, por razões econômicas e ambientais, deseja-se que a exaustão seja maximizada, e por isso, faz-se necessário o estudo da otimização do processo de fixação do corante nas fibras, determinando as condições ideais do processo (temperatura, tipo de corante, tipo de fibra, presença ou não de produtos auxiliares e outros) (BECHTOLD; MUSSAK, 2009; SALEM, 2010).

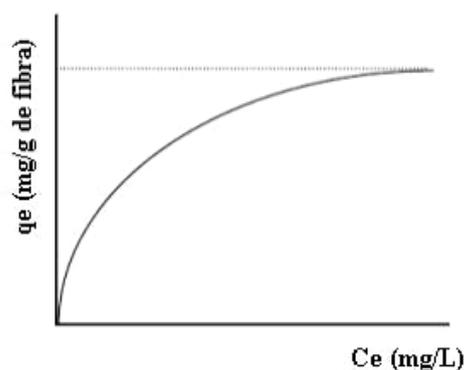
### 2.5.1.2.1 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção representam a relação de equilíbrio entre a concentração de adsorvato na fase fluida ( $C_e$ ) e a concentração do adsorvato no adsorvente ( $q_e$ ) em mesmas condições de tingimento. E estas são úteis devido às informações que fornecem sobre o mecanismo de tingimento (ASPLAND, 1998; BROADBENT, 2001).

As isotermas de adsorção podem ser afetadas por diversos fatores como pH, eletrólitos, produtos auxiliares de tingimento, temperatura e outros. Entretanto, para representar os processos de tingimento das fibras naturais, duas principais isotermas de adsorção são conhecidas: Langmuir e Freundlich (SILVA, 2013; GIACOMINI, 2014; STEPOVA; SYSA; KONANETS, 2022).

A teoria de Langmuir tem sido aplicada em muitos processos de tingimento, e assume que os adsorventes são estruturalmente homogêneos tendo sítios semelhantes de sorção, que são energeticamente idênticos. De acordo com este modelo, o corante e a fibra interagem fortemente por possuírem polaridade oposta e o corante possuir afinidade específica, pois possui sítios limitados (BROADBENT, 2001; VINOD *et al.*, 2010; WANG; GOU, 2020; STEPOVA; SYSA; KONANETS, 2022). Um exemplo disso, segundo Salem (2010), é a curva que representa o equilíbrio entre corantes ácidos e fibras de lã e poliamida, e corantes catiônicos aplicados em fibras acrílicas, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Curva isotérmica de Lagmuir



Fonte: Adaptado de Salem(2010)

Esta isoterma baseia-se na existência de uma concentração de corante na fibra suficiente para formar uma monocamada sobre a superfície da fibra (ASPLAND, 1998) e é expressa pela Equação 5 (LANGMUIR, 1918).

$$q_e = \frac{q_{max}K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} \quad (5)$$

Em que  $q_{max}$  (mg g<sup>-1</sup>) representa a quantidade máxima de corante por unidade de massa de fibra de modo a formar uma cobertura da monocamada na superfície,  $C_e$  a concentração de corante em equilíbrio na fase líquida (mg L<sup>-1</sup>),  $q_e$  a quantidade de corante adsorvido por grama de fibra (mg g de fibra<sup>-1</sup>) no estado de equilíbrio, e  $K_L$ , a constante de Langmuir relacionada com a afinidade dos sítios de ligação (L mg<sup>-1</sup>) (CHAIRAT *et al.*, 2005).

O modelo de Langmuir também pode ser expresso na forma linear, conforme Equação 6.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max}K_L C_e} \quad (6)$$

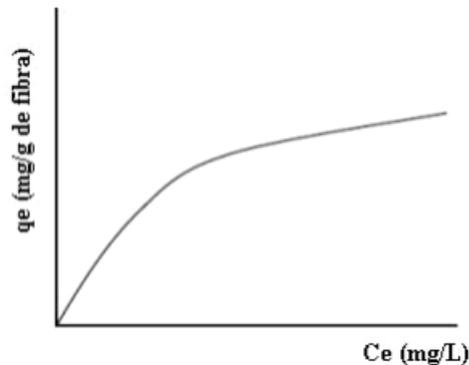
O gráfico linear de  $1.C_e^{-1}$  contra  $1.q_e^{-1}$  permite o cálculo de  $q_{max}$  a partir do coeficiente linear e  $K_L$  a partir do coeficiente angular.

O parâmetro de equilíbrio  $R_L$ , calculado pela Equação 7, permite prever se a isoterma de adsorção é favorável ou desfavorável. Valores de  $R_L$  superiores a um indicam uma adsorção desfavorável,  $R_L$  superior a zero e inferior a um representam uma adsorção favorável (LEANDRO-SILVA *et al.*, 2020).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L q_{max}} \quad (7)$$

A isoterma de Freundlich é a mais utilizada e se aplica à situação em que a adsorção de corantes na fibra não é limitada por sítios específicos de adsorção e a fibra não se torna saturada com o corante, ou seja, quanto maior a concentração de corante na solução de tingimento, mais corante adere-se a fibra (BROADBENT, 2001; KUMAR *et al.*, 2010; WANG; GOU, 2020; STEPOVA; SYSA; KONANETS, 2022). Um exemplo disto, segundo Salem (2010), é a curva de equilíbrio entre corantes diretos e fibras celulósicas, em que o corante e a fibra possuem a mesma polaridade e a interação entre eles é fraca, decorrendo em ligações de hidrogênio e forças de Van der Waals, como apresenta a Figura 10.

Figura 10 – Curva isotérmica de Freundlich



Fonte: Adaptado de Salem (2010)

O modelo de Freundlich assume que a superfície do adsorvente é heterogênea, com sítios que têm diferentes energias de adsorção e não são igualmente disponíveis. Esse modelo descreve um processo reversível e não se restringe à formação de uma monocamada. A equação que descreve essa isoterma é apresentada na Equação 8 (RUTHVEN, 1984; ÖZCAN; ÖZCAN, 2004).

$$q_e = K_F C_e^n \quad (8)$$

Em que  $K_F$  representa a constante de equilíbrio de adsorção de Freundlich ( $L g^{-1}$ ) e  $n$  o fator de heterogeneidade (valores de  $n$  na faixa de  $1 < n < 10$  indicam uma adsorção favorável) (NAMANE *et al.*, 2005).

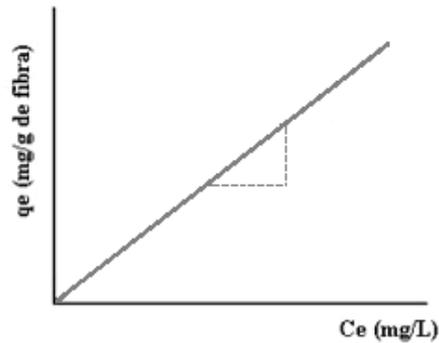
A Equação 9 representa a forma linear da equação de Freundlich.

$$\ln q_e = \ln K_F + n \ln C_e \quad (9)$$

Por meio desta equação, é possível determinar o valor de  $K_F$  pelo coeficiente linear e  $n$  diretamente pelo coeficiente angular.

Além das duas principais isotermas de adsorção para os corantes naturais, vale ressaltar como conhecimento a isoterma de Nernst, relacionada a curva de equilíbrio de corantes e fibras não-iônicas. Como exemplo, pode-se citar o tingimento da fibra de poliéster com o corante disperso, onde a distribuição se dá pela solubilidade do corante com a fibra. Na Figura 11 é apresentada a curva isotérmica de Nernst (SALEM, 2010, COPINI, 2018).

Figura 11 – Curva isotérmica de Nernst



Fonte: Adaptado de Salem (2010)

A curva isotérmica de Nernst exprime a relação linear entre o corante na fibra e o corante residual no banho, finalizando no ponto de saturação da fibra. A Equação 10 representa essa linearidade, sendo  $K$  o coeficiente de partição entre a fibra e o banho (LIMA, 2020).

$$q_e = KC_e \quad (10)$$

### 2.5.1.3 Parâmetros termodinâmicos

Os estudos termodinâmicos tratam do fluxo de energia em condições de equilíbrio, ou próximas de equilíbrio e as demais propriedades associadas aos estados de equilíbrio da matéria (BAUMAN, 1972). Os três parâmetros termodinâmicos a serem estudados para compreender se o processo de tingimento é favorável ou não do ponto de vista termodinâmico e se a adsorção ocorre com absorção ou liberação de energia, são a variação de entalpia ( $\Delta H^\circ$ ), a energia livre de Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) e a entropia ( $\Delta S^\circ$ ).

A constante de equilíbrio termodinâmico em tingimento por esgotamento pode ser definida pela Equação 11.

$$K'_c = \frac{(C_0 - C_e) \times L}{C_e} \quad (11)$$

Em que  $C_0$  representa a concentração inicial de corante na solução de tingimento ( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $C_e$  é a concentração de corante residual na solução de tingimento em equilíbrio ( $\text{mg L}^{-1}$ ),

e  $L$  a relação de volume de solução por massa de substrato têxtil ( $\text{mL g}^{-1}$ ) (BROADBENT, 2001).

A constante de equilíbrio  $K'_C$  representa a razão entre a concentração de adsorvato na superfície do adsorvente e a concentração de adsorvato residual na solução ( $C_e$ ). Em situação ideal, todo adsorvato seria aderido à superfície do adsorvente, ou seja,  $C_e$  teria um valor nulo. Neste sentido, ao plotar  $K'_C$  como função de  $C_e$  e analisar o ajuste linear da curva obtida, obtêm-se como intercepto da reta no eixo das ordenadas (extrapolação de  $C_e$  para zero) o valor da constante de equilíbrio padrão,  $K^0_C$  (DOTTO *et al.*, 2011).

A variação de energia livre de Gibbs ( $\text{kJ/mol}$ ) é calculada pela Equação 12.

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_C^0 \quad (12)$$

Em que  $R$  representa a constante dos gases ( $8,314 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) e  $T$  a temperatura da solução (K) (KALAVATHY *et al.*, 2005).

Os demais parâmetros de entalpia ( $\text{kJ/mol}$ ) e entropia ( $\text{kJ/mol}$ ) são determinados pela equação de Van'tHoff conforme apresentado na Equação 13.

$$\ln K_C^0 = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (13)$$

Em que os valores de  $\Delta H^\circ$  e  $\Delta S^\circ$  são obtidos pela inclinação e intersecção da reta no gráfico de  $\ln K_C^0$  versus  $1/T$ , respectivamente (KALAVATHY *et al.*, 2005).

Valores negativos da variação de energia livre de Gibbs indicam que a adsorção é espontânea e termodinamicamente favorável, e quanto mais negativo seu valor, maior é a força motriz no processo de adsorção (WU *et al.*, 2020). Valores negativos para entalpia indicam que o processo de adsorção é exotérmica enquanto valores positivos indicam um processo de adsorção endotérmico. E valores positivos para entropia indicam um aumento da aleatoriedade na interface sólido-solução originada por modificações estruturais no adsorvato e no adsorvente (KALAVATHY *et al.*, 2005).

## 2.6 SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Desde a publicação do relatório da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) em 1987, o movimento pelo desenvolvimento sustentável vem ganhando força, trazendo consigo, diversas iniciativas relacionadas ao cuidado com o meio ambiente em diferentes ramos industriais como automobilístico, química, cosmética e têxtil (BARBIERI *et al.*, 2010). No relatório, desenvolvimento sustentável foi definido como uma:

Exploração equilibrada dos recursos naturais, nos limites da satisfação das necessidades e do bem-estar da presente geração, assim como de sua conservação no interesse das gerações futuras. [...] Desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas necessidades (CMMAD, 1987).

No geral, a indústria têxtil utiliza de forma intensa os recursos naturais em seu ciclo de fabricação, encontrando-se na segunda posição das indústrias mais poluidoras do mundo, perdendo apenas para a indústria petrolífera. Este fato justifica-se pela extensa cadeia produtiva e elevada quantidade de insumos utilizados durante as etapas de produção. Cada etapa da cadeia têxtil, seja esta fiação, malharia, tecelagem, beneficiamento, confecção ou até mesmo administrativo, provoca alterações no meio ambiente trazendo consequências a todos os seres vivos (BARROS, 2016; FREITAS, 2017).

O setor de beneficiamento, englobando os principais processos de preparação, tingimento e acabamento, destaca-se pelo elevado consumo e descarte no volume de água, corantes e diversos produtos químicos auxiliares utilizados. Segundo Morais e colaboradores (2021), o consumo de água necessário para o tingimento de um quilograma de tecido de poliamida na cor roxa (Pantone 19-2024) é de 40 litros para cada quilograma tingido. Este elevado volume de água utilizado no tingimento gera efluentes com contaminantes complexos, quimicamente resistentes e persistentes aos processos de biodegradação. Em vista disto, não é surpreendente que a indústria têxtil seja responsável por cerca de 20% da poluição das águas de toda a atividade industrial do planeta (MOODY'S INVESTORS SERVICE REPORT, 2021). Vale ressaltar que a geração destes resíduos depende diretamente dos processos desenvolvidos no meio produtivo, referente aos maquinários, matéria-prima, aditivos auxiliares, e outros.

A utilização de materiais de origem química é comum na indústria têxtil, como na produção de fios e tecidos de poliéster e poliamida, ambos de origem petroquímica. Os

processos posteriores à produção de fio e tecido como tinturaria, acabamentos, estamparia e lavanderia também envolvem diversas reações químicas que podem ser nocivas ao meio ambiente. Assim, é necessário que haja uma correta gestão de substâncias químicas utilizadas nos processos têxteis, a substituição de compostos sintéticos por naturais e menos agressivos, a priorização de uso de substâncias não tóxicas, e a promoção da reciclagem destes insumos (FCEM, 2020b).

A crescente preocupação sobre como as indústrias operam ou administram os resíduos gerados em relação ao meio ambiente fez com que vários segmentos adotassem medidas de controle quanto às poluições industriais. A maciça exploração dos recursos naturais, escassez de água, o elevado custo para sua captação e a demanda de regulamentações e legislações cada vez mais rigorosas para emissão de efluentes aumentou significativamente a atenção para a sustentabilidade ambiental (RAMLOW, 2018).

Devido ao aumento da pressão exercida pela legislação nos últimos anos, cresceu consideravelmente a aplicação de técnicas para atenuar os impactos ambientais ao ecossistema. Dentre essas medidas, destacam-se o reúso da água, o tratamento de água além do nível secundário, a economia no uso de insumos e recursos, e opções de beneficiamento com menor impacto ambiental (QUEIROZ *et al.*, 2016). Além disso, com o avanço da ciência e da tecnologia visando o aumento da produção, racionalização de custo e tempo, e gestão ambiental, as atividades industriais vêm ganhando novos formatos.

### **2.6.1 Corantes naturais**

Os corantes naturais são conhecidos desde os tempos pré-históricos por seu uso, principalmente na coloração de substratos alimentares e fibras têxteis (SAMANTA; KONAR, 2011). Embora esta arte de tingir tecidos com corantes naturais tenha resistido ao longo do tempo, um rápido declínio no uso destes iniciou-se com o surgimento dos corantes sintéticos, devido a sua imediata disponibilidade a um preço econômico e ampla variedade de cores (ZERIN *et al.*, 2019; KHATTAB; ABDELRAHMAN; REHAN, 2020).

Entretanto, devido à conscientização ambiental global e à ênfase dada aos processos de produção mais limpos e ecológicos, houve um renascimento do uso de corantes naturais para o tingimento de fibras têxteis tanto na academia quanto na indústria (VENKATASUBBU; ANUSUYA, 2017; YUSUF *et al.*, 2017; ZERIN *et al.*, 2019). Destacam-se as sementes de jenipapo (*Genipa americana*), urucum (*Bixaorellana*), açaí (*Euterpe oleracea*), planta de alfafa

(*Mendicago sativa*), rizomas da cúrcuma (*Curcuma longa*) e inseto cochonilha (*Dactylopius coccus*) como fonte de corantes naturais (ARAÚJO, 2006; SAMANTA; KONAR, 2011; ELNAGAR *et al.*, 2014). A principal vantagem destes corantes é a sustentabilidade, ou seja, eles não causam problemas ambientais durante a fase de produção e mantêm o equilíbrio ecológico (ABATE *et al.*, 2020).

Além da sua natureza ecológica (LOKHANDI; DORUGADE, 1999), os corantes naturais destacam-se por possuir múltiplas propriedades funcionais e benefícios para a saúde (FRANCIS, 1989; SCHIOZER, 2007), encontrando aplicações nas áreas farmacêutica, alimentícia, cosmética e médica (UMBREEN; ALI, 2008; MIRJALILI; KARIMI, 2013). E com o passar dos anos, o consumidor tem se preocupado em consumir produtos de origem natural, levando as indústrias a buscarem alternativas naturais em sua produção (PARIZE, 2009).

O consumo internacional de corantes naturais ainda é inferior ao de corantes sintéticos, devido às limitações existentes e às desvantagens técnicas desses corantes, como problemas de estabilidade com temperatura, pH, oxigênio e luz (SACHAN; KAPOOR, 2007; PARIZE, 2009; KRIZOVA, 2015), além de difícil reprodução das cores e a falta de conhecimento técnico e padronização sobre as técnicas de extração e tingimento (SILVA, 2013). Entretanto, os corantes naturais vêm conquistando a cada ano uma nova fatia no mercado, apresentando crescimento anual de 5 a 10%, o dobro dos corantes sintéticos (STRINGHETA, 2007).

Os corantes naturais podem ser encontrados em diferentes folhas, raízes, flores, sementes, frutas, algas e fungos, e em outros elementos da natureza (SINHA *et al.*, 2018; PARIZE, 2009). E a partir destes elementos, inúmeros corantes renováveis e biodegradáveis são obtidos (VANKAR, 2017). Entretanto, os componentes de cor destas fontes devem ser extraídos do ponto de vista da maximização do rendimento de cor para o tingimento do substrato têxtil (SILVA, 2013; GIACOMINI, 2014). Esta extração pode ser entendida como a separação do componente de cor desejado por meios físicos e/ou químicos, e sua eficácia, segundo Samanta e Agarwal (2009), depende de fatores como o método utilizado e das condições de extração como o pH, temperatura, tempo e relação de banho. Os métodos comumente empregados para extração envolvem extração por meio aquoso (LEITNER *et al.*, 2012; YOO; JEON, 2012), com fluido supercrítico utilizando o dióxido de carbono como solvente (BORGES *et al.*, 2012), uso de solventes orgânicos utilizando equipamentos de extração relevante ou o método por Soxhlet (HASAN, 2014), por enzimas (TIWARI *et al.*, 2010) e por ultrassom (SUN *et al.*, 2011).

Um dos problemas encontrados no tingimento com corante natural está relacionado com uma afinidade limitada e às baixas propriedades de solidez do corante natural, principalmente solidez à lavagem e a exposição à luz. Entretanto, este problema tem sido tratado com a utilização de sais metálicos como mordentes na etapa de tingimento, utilizados para melhorar a adsorção, a fixação e as propriedades de resistência do corante. O mordente pode ser de origem vegetal, de sais orgânicos, ou mineral, e atua de forma a atrair as moléculas do corante, criando uma ligação com a fibra pela formação de complexos de coordenação (SILVA, 2013; GIACOMINI, 2014; SALEH; MOHAMED, 2019).

Segundo Vankar (2007), as ligações envolvidas na reação fundamental entre um corante natural e o agente mordente é a ligação covalente com o oxigênio e uma ligação coordenada do metal com o oxigênio duplamente ligado, conhecido também como quelação. Segundo o mesmo autor, o mordente ideal deve produzir elevado rendimento de cor, e não deve comprometer seriamente as propriedades físicas das fibras e as propriedades de solidez dos corantes. A escolha do mordente depende da natureza do corante, e o mesmo pode ser aplicado antes do tingimento (pré-mordentagem), durante o tingimento (mordentagem simultânea) ou após o tingimento (pós-mordentagem), sendo a pré-mordentagem o método mais comum, visto que quando o corante é aplicado posteriormente, uma quantidade maior de ligações é formada.

### 2.6.2 Colorimetria

Dentro do beneficiamento, o contato com as cores é constante, desde a formulação de receitas até a análise final do substrato tingido. O estudo das cores é denominado colorimetria, e tem como objetivo a determinação e especificação da cor, atribuindo-se números a elas (SALEM, 2010).

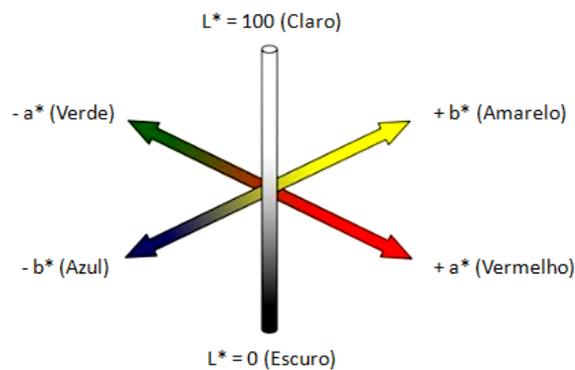
No tingimento têxtil, a força colorística do material tingido está diretamente relacionada à quantidade de corante absorvida pela fibra, e esta pode ser definida mediante a sua curva de reflectância medida pelo equipamento espectrofotômetro. A partir disto, por meio da equação de Kubelka-Munk, é possível estabelecer a força da cor, denominada por K/S como apresenta a Equação 14 (ŠTĚPÁNKOVÁ; WIENER; RUSINOVÁ, 2011; GIACOMINI, 2015).

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (14)$$

Em que  $R$  representa a fração de reflectância,  $K$  o coeficiente de absorção e  $S$  o coeficiente de difusão da luz.

Com o emprego do equipamento espectrofotômetro colorímetro também é possível quantificar a cor em diferentes coordenadas definidas pelo sistema de Comissão Internacional de Iluminação (CIE), denominadas CIELab cujos eixos são designados por  $a^*$  (vermelho-verde),  $b^*$  (amarelo-azul) e  $L^*$  (luminosidade), conforme apresenta a Figura 12.

Figura 12 – Espaço tridimensional de cores do sistema CIELAB



Fonte: Adaptado de Liew *et al.* (2008)

## 2.7 TÊXTEIS FUNCIONAIS

Nos últimos anos, os materiais têxteis vêm sendo aplicados em diversos setores industriais por se tratar de materiais seguros, de fácil manuseio e com potencial de inovação. Com o avanço da tecnologia, os materiais têxteis vêm procurando maximizar seu potencial, dotando-se de características diferenciadas que complementam as suas propriedades usuais (FERREIRA; FERREIRA; OLIVEIRA, 2014; RIVERO *et al.*, 2015; FARUK *et al.*, 2021).

A busca pelo desenvolvimento de produtos com maior valor agregado para acelerar o ritmo dos negócios e dos mercados tem crescido. Os denominados têxteis técnicos, funcionais e inteligentes fazem parte deste novo foco da indústria têxtil. Ramos como o automobilístico, proteção pessoal, construção civil, saúde, arquitetura e esportivo têm investido nestes materiais que possibilitam diferentes funcionalidades, seja pela utilização de novas fibras, desenvolvimento de novas estruturas (estrutura do tecido, abertura da malha, entrelaçamentos orientados e tridimensionais), aplicação de acabamentos diferenciados, ou até mesmo pela integração de sistemas eletrônicos (FILGUEIRAS; FANGUEIRO; RAPHAELLI, 2008; FERREIRA; FERREIRA; OLIVEIRA, 2014).

No que diz respeito a têxteis voltados a área da saúde, é interessante observar o processo evolutivo dos têxteis e a introdução de novos modelos e novas pesquisas disponibilizadas a cada ano sobre o tema, incluindo materiais com foco no controle de umidade, aplicações de agentes antimicrobianos, e mais recentemente, materiais que entregam ingredientes ativos ou interagem com a feridas por exemplo (OVINGTON, 2007; SHIRVAN; NOURI, 2020; FERNANDES *et al.*, 2021).

## 2.8 EFEITO ANTIMICROBIANO EM TÊXTEIS

O crescimento microbiano está diretamente relacionado com as substâncias nutritivas nos materiais e as condições ambientais de umidade e temperatura favoráveis. Segundo Sun e Kim (2001), os materiais têxteis demonstram ser um vetor na proliferação microbiana e, também, na transferência de agentes patológicos devido a sua grande área superficial, capacidade de reter umidade e de ser em sua maioria de fibras naturais. As fibras celulósicas, por exemplo, constituem um ótimo local para a proliferação microbiana, podendo ocasionar em perda de resistência e de alongamento das fibras, assim como descoloração, manchas, odor e a própria degradação do material. Por esse motivo, houve o aumento no uso de fibras sintéticas devido a propriedades de resistência natural à degradação microbiana (YANG *et al.*, 2000; ESTEVES, 2009).

Por outro lado, observa-se também o crescente interesse em tratamentos antimicrobianos por parte da indústria, devido seu potencial de proteger não só o substrato têxtil, como também o usuário, de forma a obter produtos cada vez mais eficientes, duradouros e seguros. Em ambientes hospitalares, por exemplo, os têxteis antimicrobianos são relevantes como medida preventiva na propagação de doenças e infecções, e na transmissão de microrganismos patogênicos (DE MAGALHÃES, 2015; DE SOUZA, 2018).

Os materiais têxteis antimicrobianos podem ser classificados em dois grupos: biocidas e biostáticos. A função biocida refere-se à capacidade de exterminar os microrganismos, eliminando seu crescimento e prevenindo possível contaminação biológica. Já a função biostática refere-se à inibição do desenvolvimento das colônias, ou seja, proporciona um ambiente desfavorável para seu crescimento. Para fins de proteção, em especial para têxteis médicos, as funções biocidas são preferíveis por fornecerem a inativação rápida e eficiente dos microrganismos indesejáveis (SUN; WORLEY, 2005).

A aplicação de compostos antimicrobianos pode ser dividida em dois principais métodos: a introdução do composto na matriz polimérica antes ou durante a extrusão do material, e a aplicação do composto em tratamentos durante processos como impregnação, esgotamento ou acabamento (ESTEVES, 2009).

Os têxteis com tratamento antimicrobiano devem cumprir requisitos como: evitar infecções por microrganismos patogênicos, controlar o desenvolvimento e a propagação de microrganismos e proteger o produto têxtil (ESTEVES, 2009). Entretanto, o maior desafio para estes têxteis funcionais é a durabilidade das funções antimicrobianas, isto é, a resistência à lavagem destas funções quando submetida a múltiplas lavagens ao longo da vida. A durabilidade do tratamento antimicrobiano é classificada em temporária ou durável, e essa característica está diretamente associada com o modo em que o agente foi aplicado. As propriedades antimicrobianas temporárias são obtidas por processos têxteis superficiais como os acabamentos têxteis. As funções antimicrobianas duráveis, que suportam em torno de 50 lavagens, são obtidas por processos onde há a incorporação do agente na fibra ou tecido em procedimentos que irá originar a fibra ou pela modificação da própria fibra onde ocorrem ligações químicas fortes de modo em que o agente é liberado lentamente favorecendo o efeito prolongado (SUN; WORLEY, 2005).

Muitos compostos são utilizados como agentes antimicrobianos, tal qual compostos orgânicos sintéticos como triclosan, compostos de amônia quartenária, derivados halogenados e metais de prata e o cobre. Entretanto, estes compostos são de origem sintética e o uso excessivo destes agentes pode estimular a resistência das bactérias e fungos e gerar consequências negativas para o usuário e para o meio ambiente. Os agentes halogenados como  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$  e  $\text{I}_2$ , por exemplo, podem inativar rapidamente os microrganismos, porém, a maioria destes é tóxico e pode irritar a pele. Assim como o uso demasiado da prata e triclosan como agente antimicrobiano, que pode causar efeitos permanentes na pele. Por este motivo, tem se optado por agentes antimicrobianos naturais, presentes em plantas, animais e microrganismos (SUN; WORLEY, 2005; DE SOUZA, 2018).

Apesar da utilização de materiais de estruturas nanométricas ter atraído atenções por seu potencial de aplicação em diversas áreas técnicas como em aplicações médicas com nanopartículas de prata para materiais bactericidas (COUTINHO, 2018), observou-se também o aumento em pesquisas de plantas medicinais com potencial de uso antimicrobiano na última década, em torno de 167% (MARMITT *et al.*, 2015).

Há diversos métodos para avaliar a eficiência da atividade antimicrobiana de materiais têxteis, porém, observa-se uma dificuldade em desenvolver um só teste que consiga satisfazer a abrangência dos diversos materiais têxteis existentes seja por diferentes fibras, estruturas, e outras características físicas que podem influenciar no desempenho do teste.

Em geral, os testes com têxteis antimicrobianos podem ser divididos em qualitativos, também conhecido como teste de difusão em ágar, que permite apenas a classificação qualitativamente do têxtil entre bom ou ruim; e os quantitativos, que permitem a quantificação da redução bacteriana em contato com o material em questão. Ambos os métodos possuem procedimentos descritos por normas técnicas (ESTEVES, 2009; SWOFFORD, 2010; EMPEL *et al.*, 2019).

## 2.9 LIBERAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS ATIVAS

Basicamente, a liberação é baseada no fenômeno de transferência de massa decorrente da diferença de concentração entre as fases (TREVISOL *et al.*, 2018), e a mesma pode variar pela escolha do material e de sua estrutura (geometria e diâmetro). Uma liberação rápida (em poucas horas), por exemplo, é desejável para administração de ativos e para curativos que requerem trocas rápidas, enquanto que a liberação mais lenta é desejada quando as trocas de curativos causam algum desconforto ao paciente ou quando uma liberação imediata de ativos pode causar dor ou toxicidade (LEUNG *et al.*, 2011).

A análise quantitativa da liberação controlada *in vitro* de substâncias ativas aprisionadas em polímeros pode fornecer informações importantes. Logo, para isso, utilizam-se equações genéricas que apresentam uma relação da dissolução em função de alguns parâmetros relacionados à forma do polímero (BEZERRA, 2016).

A modelagem matemática empírica do processo de liberação desempenha um papel importante em sistemas de liberação controlada, pois permite a comparação de diferentes perfis de liberação e ajuda a compreender os parâmetros de liberação (MENDES, 2020). Neste contexto, vários modelos empíricos e semi-empíricos têm sido propostos para descrever a liberação de compostos ativos. Dentre estes, os modelos de Higuchi e de Korsmeyer-Peppas são destacados como os mais comumente usados, pois descrevem a liberação por difusão.

O termo difusão refere-se ao movimento aleatório de moléculas no interior do sistema, resultando no deslocamento de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração (MENDES, 2020). Portanto, a difusão de uma substância ocorre devido a um

gradiente de concentração que pode ser descrito pela lei de difusão de Fick, como apresenta a Equação 15 (BIRD; STEWART; LIGHFOOD, 2004).

$$\frac{dQ}{dt} = -D \frac{dC}{dX} \quad (15)$$

Em que  $dQ/dt$  é a velocidade de difusão do ativo transportado num determinado tempo,  $Q$  a massa transportada no tempo  $t$ ,  $D$  o coeficiente de difusão,  $dC/dX$  a concentração da substância que se difunde na coordenada espacial normal à seção.

A Equação 15 não descreve a maioria das situações práticas de difusão, onde há a variação do fluxo e do gradiente de concentração com o tempo. Neste sentido, a segunda Lei de Fick (Equação 16) descreve melhor esse processo de transporte em regime transiente com o acúmulo ou esgotamento do componente que se encontra em difusão.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (16)$$

Quando consideradas a difusividade e a espessura do material constantes, obtém-se a massa total de soluto transferido em um intervalo de tempo de 0 a  $t$  por meio da Equação 17, uma solução analítica em série derivada da 2ª Lei de Fick para sólidos semi-infinitos (CUSSLER, 2009).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D}{\delta^2} t\right) \quad (17)$$

Nesta Equação,  $M_t$  é a massa do agente ativo liberada no tempo  $t$ ,  $M_\infty$  é a massa do soluto liberado em tempo infinito ( $t$ ), e  $\delta$ , a espessura da matriz.

O modelo de Korsmeyer-Peppas, também conhecido como Lei da Potência é um modelo semi-empírico simples, que relaciona exponencialmente a liberação do soluto e o tempo decorrido e é utilizada quando o mecanismo de liberação não é bem conhecido. Este modelo é usado para explicar os efeitos combinados da difusão Fickiana e o relaxamento viscoelástico em sistemas poliméricos. A Equação 18 pode ser utilizada para avaliação quando até 60 % do composto for liberado (KORSMEYER *et al.*, 1983).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = kt^n \quad (18)$$

Nesta equação,  $k$  é a constante associada às características estruturais e geométricas, e  $n$  é o expoente de difusão característico do mecanismo de liberação.

Quando o valor do expoente difusional  $n$  for igual a 0,5 o mecanismo de liberação é controlado por difusão e apresenta um comportamento Fickiano. Valores de  $n$  entre 0,5 e 1,0 podem ser considerados como transporte anômalo, em que o intumescimento da matriz influencia o processo, ocorrendo superposição de fenômenos, e  $n$  igual ou superior a 1,0 apresenta difusão não-Fickiana (SIEPMANN; PEPPAS, 2001).

O modelo de Higuchi é descrito por um processo de liberação puramente difusivo (HIGUCHI, 1961). Por este motivo, essa equação apresenta limitações para retratar sistemas de liberação, principalmente decorrentes do intumescimento. No entanto, é um modelo mais realista que o de ordem zero, por exemplo, sendo mais aplicável em matrizes pouco solúveis com um soluto muito solúvel (LOPES; LOBO; COSTA, 2005). Neste modelo, pode-se assumir uma superfície plana para curtos tempos de liberação e a determinação aproximada do coeficiente de difusão aparente da difusão do agente ativo usando a equação de Higuchi (Equação 19), onde  $D$  é o coeficiente de difusão aparente da liberação do fármaco, e  $\delta$  é a largura da matriz planar (MARTÍ *et al.*, 2021).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 4 \sqrt{\frac{Dt}{\pi\delta^2}} \quad (19)$$

Outros modelos também foram desenvolvidos por Higuchi para avaliar a liberação a partir de diferentes sistemas matriciais. A Equação 20 é derivada da Equação 19 e  $K$  é a constante de dissolução de Higuchi (LOBO; COSTA, 2001).

$$\frac{M_t}{M_\infty} = K\sqrt{t} \quad (20)$$

## 2.10 CÚRCUMA LONGA L.

A *Cúrcuma longa* L., botanicamente é relacionada ao gengibre por pertencerem à mesma família, *Zingiberaceae* (VENKATASUBBU; ANUSUYA, 2017). É uma planta perene de caule curto, com folhas grandes e rizomas ovalados de cor amarelo-acastanhada e cicatrizes anelares conforme apresentado na Figura 13. Conhecida no mercado internacional, a cúrcuma tem sua importância econômica devido às características de cor, odor e sabor de seus rizomas (CECILIO FILHO *et al.*, 2000; CHATTOPADHYAY *et al.*, 2004).

Figura 13 – Planta, rizomas, flor e extrato em pó da *Cúrcuma longa* L. respectivamente



Fonte: DIVYA *et al.* (2019); FURMULY; AZEMI (2020)

Originária do subcontinente indiano e de áreas tropicais do sudeste da Ásia, a cúrcuma é utilizada em todo o mundo desde os tempos antigos. É fortemente cultivada em países como Índia, Indonésia, Paquistão, China e outros. O consumo mundial da cúrcuma não é conhecido, mas acredita-se, contudo, que a Índia seja o país maior produtor, consumidor e exportador (MIRJALILI; KARIMI, 2013; CECILIO FILHO *et al.*, 2000).

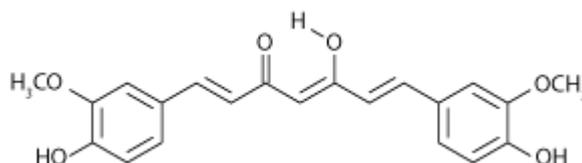
Introduzida no mundo ocidental no século XIV (AGGARWAL *et al.*, 2007), a cúrcuma possui grande representatividade em países latino-americanos como o Brasil, onde também é cultivada em alguns estados com menor expressão econômica. Segundo Caetano (2011), o

município de Mara Rosa-GO apresenta o maior plantio comercial de cúrcuma, responsável por cerca de 90% da produção nacional e produtividade média de 800 a mil toneladas por ano.

A cúrcuma é composta por vários constituintes moleculares, destacando-se a curcumina e outros curcuminóides, como a demetoxicurcumina e bisdemetoxicurcumina, além de conter proteínas, gorduras, minerais, carboidratos e outros elementos inorgânicos em menor quantidade (SACHAN; KAPOOR, 2007; BECHTOLD; MUSSAK, 2009; KIM; JNAG, 2009).

Utilizado em diversos segmentos como perfumaria, cosmético, medicinal, farmacêutica, têxtil, condimentar e alimentício, a curcumina (Figura 14) se destaca por ser um corante natural amarelo atóxico, seguro, biocompatível e ecológico (ABATE *et al.*, 2020).

Figura 14 - Estrutura química da curcumina (1, 7-bis (4-hidroxi-3-metoxifenil) -1, 6-heptadieno-3, 5-diona)



Fonte: Adaptado de Venkatasubbu e Anusuya (2017)

Apesar de ser o principal constituinte, a curcumina apresenta concentração de apenas 2 a 8% na cúrcuma, dependendo da variedade, maturidade e *habitat*. Entretanto, a demetoxicurcumina e a bisdemetoxicurcumina também contribuem em menor quantidade com cor, sabor e propriedades bioativas (GOVINDARAJAN, 1980; SACHAN; KAPOOR, 2007).

Famoso por ser um dos corantes amarelos mais brilhantes que ocorrem naturalmente, a curcumina, denominado como C.I. Amarelo natural 3, é insolúvel em água, mas solúvel em álcoois. Apresenta estabilidade ao aquecimento, sensibilidade à luz, e variação de sua coloração de acordo com o pH (GOVINDARAJAN, 1980; UMBREEN *et al.*, 2008).

Devido a uma variedade de caracterizações específicas, o uso da curcumina ganhou atenção significativa de pesquisa em todo o mundo sobre sua utilização na área médica. Usada principalmente na medicina tradicional chinesa, iraniana e indiana, a cúrcuma é considerada uma planta medicinal por conter princípios ativos como a curcumina e os demais curcuminóides que lhe confere atividade terapêutica (PICCOLI, 2008; NOORAFSHAN; ASHKANI-ESFAHANI, 2013).

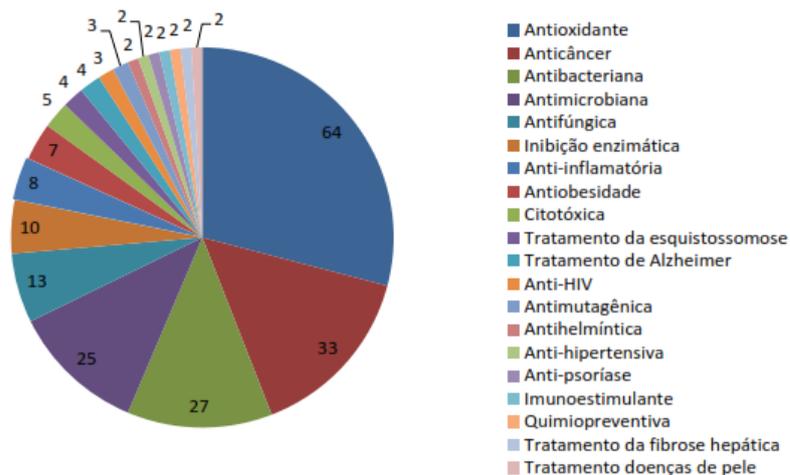
Sua utilização como planta medicinal é antiga na medicina Ayurveda, Unani e Siddha como remédio caseiro para várias doenças, infecções e inflamações, também no curativo de mordidas, queimaduras e outras doenças de pele (THAKUR *et al.*, 1989; AMMON; WAHL, 1991; EIGNER; SCHOLZ, 1999).

Estudos farmacológicos demonstram que a curcumina possui várias propriedades bioativas e é usada no sistema de medicina moderno, sendo reconhecida por suas atividades anti-inflamatórias, antimicrobiana, antioxidante e antitumorais (AKBAR *et al.*, 2018; AHANGARI *et al.*, 2019).

A atividade antioxidante e anti-inflamatória, por exemplo, é importante na cicatrização de feridas, e tem apresentado efeitos curativos em feridas de pele, assim como a atividade antimicrobiana que apresentou atividade inibitória contra um amplo espectro de bactérias (MAHESHWARI, 2006; PRIYADARSINI, 2009; NOORAFSHAN; ASHKANI-ESFAHAN, 2013; ABATE *et al.*, 2020).

O Ministério da Saúde (2015) levantou na literatura as principais atividades terapêuticas relacionadas com a cúrcuma, e encontrou atividade antioxidante, anticâncer, antibacteriana, antimicrobiana, antifúngica, anti-inflamatória, quimiopreventiva e outros, conforme apresentado na Figura 15.

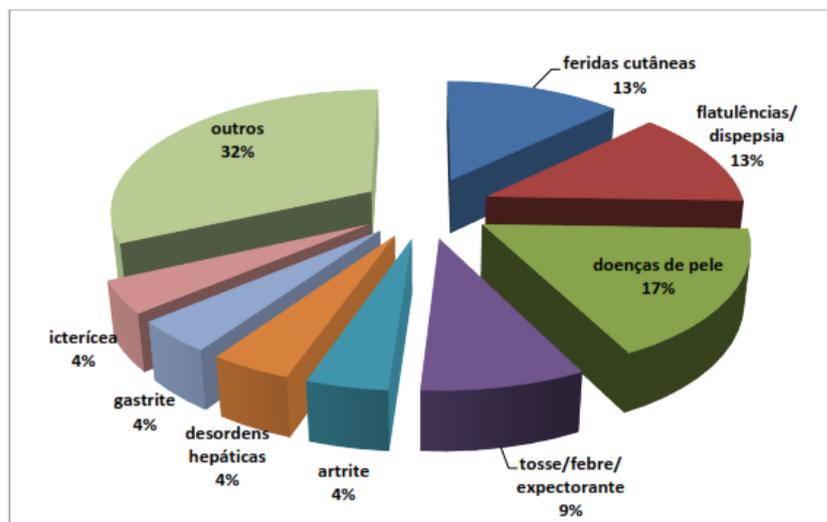
Figura 15 – Quantidade de citações relacionadas com as principais atividades bioativas da cúrcuma longa levantada pelo Ministério da Saúde em 2015



Fonte: Ministério da Saúde (2015)

Outras propriedades terapêuticas também são atribuídas à curcumina como: cicatrizante, anti-proliferativa, antitumorais, antiangiogênicos, repelência à insetos, antimalárica, antidiabética, antiulcerante, hipotensora, dentre outras (SINHA *et al.*, 1975; SAJITHLAL, 1998; BARIK *et al.*, 2007; SACHAN; KAPOOR, 2007; RUDRAPPA; BAIS, 2008). Devido à sua capacidade de afetar uma ampla gama de alvos moleculares e possuir um excelente perfil de segurança, a curcumina demonstrou ser um candidato potencial para o desenvolvimento da medicina moderna e para a prevenção e /ou tratamento de várias doenças como apresenta a Figura 16 (CHATTOPADHYAY *et al.*, 2004; NOORAFSHAN; ASHKANI-ESFAHANI, 2013).

Figura 16 – Principais aplicações etnofarmacológicas descritas para os rizomas da *Cúrcuma longa*



Fonte: Ministério da Saúde (2015)

A cúrcuma foi muito utilizada pelos artesãos indianos como corantes naturais antes do surgimento dos corantes sintéticos por ser fonte de uma cor intensa e boa solidez à lavagem, além de mostrar forte afinidade com fibras naturais como lã e seda (SACHAN; KAPOOR, 2007; REDDY *et al.*, 2013).

A curcumina é um corante direto e mostrou-se capaz de tingir materiais têxteis como a lã, seda, algodão, pelo de coelho e outras fibras em processos de tingimento contínuo ou batelada (UMBREEN *et al.*, 2008; AMMAYAPPAN; MOSES, 2009). Por possuírem cargas opostas, a fibra de lã, por exemplo, possui forte afinidade com a curcumina garantindo uma boa solidez à lavagem e efeito antimicrobiano durador, o oposto a fibra de algodão que possui a

mesma carga negativa que a curcumina, o que acarreta em uma afinidade inferior (REDDY *et al.*, 2013). Apesar disso, a utilização da cúrcuma no tingimento têxtil mostra ser um processo econômico por não haver a necessidade de acabamentos antimicrobianos posteriores (MIRJALILI; KARIMI, 2013).

## 2.11 ESTADO DA ARTE

O estado da arte do processo de extração e tingimento com a cúrcuma assim como a aplicação da cúrcuma em materiais têxteis e a liberação de seus princípios ativos foi investigado. A maioria das publicações acadêmicas abrange cada tema de forma separada: extração do corante, tingimento com a cúrcuma, e a liberação de ativos para tratamentos terapêuticos.

A seguir, será apresentada uma visão geral do estado da arte da aplicação da cúrcuma e seus compostos ativos para obtenção de materiais antimicrobianos, terapêuticos e sustentáveis. São apresentados os melhores resultados de cada estudo. As pesquisas na literatura foram realizadas até o ano de 2022 na base de dados Web of Science e ScienceDirect.

Diversas são as técnicas encontradas na literatura para a extração do corante bruto da cúrcuma. Muitas destas envolvem metodologias simples e outras mais complexas necessitando de maquinários específicos (JIANG; HOSH; CHARCOSSET, 2021). Entre os métodos mais simples em relação à aparelhagem estão as pesquisas de Kamel *et al.* (2008) que realizaram a extração em água fervente durante 1 h. O extrato foi então utilizado para o tingimento de algodão pelo método convencional e ultrassônico e obtiveram-se efeitos colorísticos intensos. Umbreen *et al.* (2008) também realizaram a extração em água, mas em diferentes temperaturas, tempo e velocidade de agitação. Neste trabalho, observou-se que os extratos obtidos à temperatura ambiente apresentaram elevada intensidade de força colorística, tornando-se ligeiramente melhor a 60 °C e maximizado quando realizados à temperatura de ebulição. A agitação em temperatura ambiente e em temperatura de ebulição após imersão e agitação durante a noite não apresentam melhoras significativas na força da cor.

Kwokonkwo (2020), por exemplo, realizou a extração do corante em proporção de 1:5 (v/v) em clorofórmio, metanol e água destilada por repouso por 168 h. O melhor rendimento se deu com o extrato de metanol, seguido pelo extrato aquoso e de clorofórmio em menores quantidades. Outros resultados usando álcoois como o etanol também foram encontrados.

Paulucii *et al.* (2013) estudaram a otimização da extração da curcumina dos rizomas da cúrcuma por diversos ensaios variando tempo, velocidade de agitação, proporção de solvente, temperatura e concentração etanólica. Como resultado do estudo, a extração com maior rendimento se deu em 24 h de extração, velocidade de agitação de 70 rpm, relação fármaco/solvente de 1:6, temperatura de 80 °C e concentração etanólica de 96%. Sendo a concentração etanólica a variável mais influente na extração, obtendo-se melhores resultados com forças próximas de 100%. Sogi *et al.* (2010) ao estudarem também os efeitos dos parâmetros de temperatura, tamanho de partícula, tempo e proporção de solvente, obtiveram o melhor rendimento quando a temperatura, tamanho de partícula, tempo de agitação e proporção de solvente foram 60 °C, 0,42 mm, 30 min e 50% v/v, respectivamente.

Quanto ao uso de corante natural da cúrcuma para o tingimento de substratos têxteis, poucos são os estudos disponíveis na literatura usando métodos convencionais de tingimento, tais como Lokhande e Dorugade (1999), Umbreen *et al.* (2008), Hasan *et al.* (2014), e Bhardwaj e Dadsena (2017). Entretanto, observou-se que o processo de tingimento com a cúrcuma fornece ao substrato elevado nível de intensidade de cor, mesmo em baixas concentrações (ABATE *et al.*, 2020), além de propriedades antibacterianas na mesma etapa produtiva, não necessitando de etapas posteriores de acabamento (VASHISHTHA, 2018). Han e Yang (2005) realizaram acabamento em tecido de lã por tingimento contínuo com a curcumina, e observaram que menos de 0,01% da curcumina inibiu 70% do crescimento da bactéria *S. aureus*, e 0,05% contra *E. coli.*, encontrando ainda uma taxa de inibição superior a 95% com 0,2% de curcumina aplicada ao tecido.

Em relação às variáveis do tingimento, Vashishtha (2018) afirma que o corante da cúrcuma produz tonalidades diferentes sob diferentes condições de tingimento. Assim, qualquer técnica de tingimento pode ser usada conforme exigência do produto final. No entanto, Lokhande e Dorugade (1999), encontraram melhores resultados de absorção de corante no tingimento com a cúrcuma pelo método de esgotamento quando comparado ao tingimento contínuo para a fibra de poliamida.

As demais variáveis de condição de tingimento como temperatura, pH, concentração, mordentes e técnicas de aplicação mordentes para o tingimento com a cúrcuma variaram bastante na literatura. Umbreen *et al.* (2008), em seus estudos, observaram que a intensidade da cor das amostras foram maximizadas em temperaturas próximas de ebulição, mostrando uma maior uniformidade em 70 °C ao tingir a fibra de algodão com o corante natural da cúrcuma. Vashishtha (2018), ao tingir fio de lã com cúrcuma em diferentes condições de tingimento,

também observou que a elevação da temperatura produz tons mais duráveis. O pH neutro apresentou os melhores resultados ao tingir a fibra de algodão (KAMEL *et al.*, 2008; HASAN *et al.*, 2014; BHARDWAJ; DADSENA, 2017), e condições ácidas apresentaram melhor adsorção de corante ao tingir a poliamida (LOKHANDE; DORUGADE, 1999). Bhardwaj e Dadsena (2017), Abate *et al.* (2019) e Abate *et al.* (2020) observaram que a intensidade da cor aumenta quando a concentração de corante também é aumentada, porém baixas concentração de curcumina, como 0,75% s.p.m., já apresentam elevado nível de intensidade da cor.

Umbreen *et al.* (2008) e Mirjalili e Karimi (2013), afirmam que o uso de mordentes aumenta a absorção do corante, representando um ganho na força colorística do tecido tingido com a cúrcuma, entretanto, o não uso de mordentes também apresenta cor intensa e elevada força colorística.

Em relação à cinética de tingimento, os ajustes às equações isotérmicas para os processos de tingimento com corantes naturais, representando o equilíbrio de tingimento variou entre os modelos de Langmuir (VINOD; PUTTASWAMY, 2010; MALEK *et al.*, 2019), Freundlich (CHAIRAT *et al.*, 2005; FARIZADEH *et al.*, 2009; ZAMRI *et al.*, 2017; DE AGUIAR *et al.*, 2018) e Nerst (WU *et al.*, 2013). Entretanto, a cinética de tingimento para o corante natural da cúrcuma e curcumina foi melhor representada pelo modelo de pseudo-segunda ordem (ZAMRI *et al.*, 2017; DE AGUIAR *et al.*, 2018; HAQUE *et al.*, 2018a; HAQUE *et al.*, 2018b), indicando que o tingimento pode ser controlado pelo processo de quimissorção.

As propriedades termodinâmicas em tingimento com corante natural apresentaram processos endotérmicos (SILVA, 2013, WU *et al.*, 2013) e exotérmicos (HAQUE *et al.*, 2018a; HAQUE *et al.*, 2018b). Haque *et al.* (2018), por exemplo, estudaram os parâmetros termodinâmicos de adsorção da curcumina em tecido de algodão e observaram que a quantidade de corante adsorvida pelo algodão diminuiu com o aumento da temperatura, o que sugere um processo exotérmico. Além disso, o valor positivo de energia livre de Gibbs obtido representou a forte afinidade entre o corante e o substrato, e o valor negativo de entropia indicou adsorção de forma mais ordenada no algodão com certa interação.

Alguns estudos apontam a curcumina como um composto de aplicação limitado devido sua baixa solubilidade em água, instabilidade química, biodisponibilidade restrita e metabolismo rápido. Por conta destas limitações, abordagens baseadas em géis e emulsões atraíram atenção nas linhas de pesquisa por estes apresentarem características flexíveis, permeáveis ao oxigênio, confortáveis para curativos e auxiliarem na estabilidade, biodisponibilidade e bioacessibilidade da curcumina (NELSON *et al.*, 2017; ARAIZA-

CALAHORRA; AKHTAR; SARKAR, 2017; HUSSAIN *et al.*, 2017; NACHIMUTHU *et al.*, 2018).

Apesar da aplicação de forma tópica da curcumina geralmente ser preferida como procedimento convencional para fins terapêuticos, sistemas curativos de administração controlada permitem melhor acessibilidade do composto ativo no local desejável (MOHANTY; SAHOO, 2017). Assim, formulações para curativos com materiais poliméricos, como quitosana (NACHIMUTHU *et al.*, 2018), ou com polímeros sintéticos, misturados em diferentes formatos como filmes, fibras, emulsões, hidrogéis e nanoformulações são desenvolvidos (ARAIZA-CALAHORRA; AKHTAR; SARKAR, 2017; HUSSAIN *et al.*, 2017).

Métodos mais recentes como a liberação controlada de medicamentos ganharam destaque por envolver a prolongação da ação da droga ativa ao longo do tempo, e a liberação de uma dosagem contínua. Materiais com entrega controlada fornecem excelentes meios de administrar medicamentos às feridas de forma consistente e sustentada por longos períodos, sem a necessidade freqüente de troca de curativos (BOATENG *et al.* 2008). Neste sentido, destaca-se o trabalho de Pankongadisak *et al.* (2019) que observaram a liberação da curcumina pela manta de fibras de poli (ácido L-láctico) (PLLA) contendo curcumina preparados por eletrofiação; e apontam a relação entre o aumento da quantidade liberada com o aumento da concentração inicial da curcumina.

Para entender melhor o mecanismo de liberação dos princípios ativos da cúrcuma como uso em curativos, várias tentativas foram feitas por vários grupos de pesquisa e os resultados indicam claramente a liberação sustentada dos ativos a partir de várias formulações tópicas (MOHANTY; SAHOO, 2017). Assim como diversos estudos de avaliação de segurança que indicaram a tolerância de altos níveis de dosagem da cúrcuma sem efeitos tóxicos, afirmando o potencial para o desenvolvimento de materiais curativos na medicina (NACHIMUTHU *et al.*, 2018). Meizarini *et al.* (2018), por exemplo, produziram um curativo com uma combinação de óxido de zinco e extrato de cúrcuma, e observaram efeito anti-inflamatório no processo de cicatrização de feridas de excisão em experimento *in vivo*. Nachimuthu *et al.* (2018) também obtiveram resultados positivos de cicatrização de feridas a partir de um material curativo bioativo composto por quitosana com extrato de cúrcuma na forma de filme para tratamento de feridas (*in vivo*), onde os resultados apontaram que as feridas tratadas com o filme de cúrcuma-quitosana curaram mais rapidamente quando comparadas a feridas tratadas apenas com filme de quitosana, afirmando o potencial da cúrcuma como um agente cicatrizante.

Em relação ao efeito antimicrobiano da cúrcuma, estudos apontaram a cúrcuma como um agente inibidor ao crescimento bacteriano por meio de aplicações de beneficiamento têxtil. Esse comportamento pode ser verificado no trabalho de Reddy *et al.* (2013) que aplicaram a curcumina à fibra de algodão como um agente antimicrobiano pelo método contínuo de tingimento e observaram que uma concentração muito baixa de curcumina de 0,01% foi capaz de inibir 77% de *S. aureus*, enquanto pelo menos 0,1% de curcumina foi necessária para observar uma inibição perceptível para *E. coli*. Mirjalili e Karimi (2013) também observaram efeitos antimicrobianos ao tingir a fibra de poliamida com a cúrcuma, onde os resultados apresentaram forte atividade bacteriostática contra as bactérias patogênicas *S. aureus* e *E. coli*, e observou-se também a relação proporcional de aumento da concentração de cúrcuma com a ação antimicrobiana. Entretanto, nos estudos encontrados, observou-se a falta de análises aprofundadas em relação ao mecanismo e a influência das condições do processo de tingimento, assim como as características da própria fibra têxtil utilizada na ação antimicrobiana.

Outros estudos utilizando a liberação de cúrcuma também apresentaram resultados positivos em relação aos efeitos antimicrobianos, como o estudo de Venkatasubbu e Anusuya (2017) que revestiram um tecido de algodão pelo método *spin-coating* com nanocompósito de curcumina e prata para aplicação como curativo e liberação da curcumina. Os resultados mostraram eficiência antibacteriana contra várias espécies bacterianas presente em feridas (*E. coli*, *B. subtilis*, *S. aureus*, *P. vulgaris*, *E. faecalis* e outras). Uyen *et al.* (2020) também avaliaram a liberação da curcumina e seu efeito antimicrobiano para serem utilizadas no sistema de administração de medicamentos para tratamentos terapêuticos a partir de microesferas de alginato carregadas com curcumina e obtiveram como resultado uma liberação sustentada de medicamentos por 672 h de 98,32% em pH 7,4 a 37 °C. Além de apresentar propriedades suscetíveis a *S. aureus* e resistentes a *E. coli*.

Como base no exposto acima, a cúrcuma é natural, biocompatível, biodegradável, acessível, fonte de princípios ativos e várias propriedades medicinais. Apesar de apresentar características adequadas para a tecnologia de tingimento de tecidos, a combinação da cúrcuma com substratos têxteis para processos de tingimento e também o estudo do mecanismo de liberação de seus princípios ativos ainda apresentam lacunas de pesquisa. A possibilidade de pesquisa para tingimento com corante natural e a liberação de ativos a partir de têxteis funcionais como expansão de inovação e tecnologia para a área têxtil apresenta grande potencial.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos propostos para avaliar o potencial tintorial do extrato da cúrcuma em fibras têxteis e a sua liberação.

Os experimentos de beneficiamento têxtil foram realizados no Laboratório de Beneficiamento (LABENE), e os experimentos de caracterização e liberação da curcumina foram realizados no Laboratório de Meio Ambiente (LABMAM), ambos do Departamento de Engenharia Têxtil da UFSC no Campus Blumenau. O ensaio de FTIR foi realizado no Laboratório de Análise Térmica e Espectroscopia (LTE) da UFSC, campus Blumenau, o MEV no Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Regional de Blumenau (FURB), e os ensaios antimicrobianos foram realizados no Laboratório de Microbiologia de Alimentos II no Centro de Ciências Agrárias da UFSC.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para os experimentos e análises com a cúrcuma são apresentados a seguir.

##### 3.1.1 Cúrcuma

A *Curcuma longa* utilizada nos experimentos é de origem indiana, adquirida na Alemanha. Para o trabalho, foi utilizada a cúrcuma em pó devido a disponibilidade de material e sua facilidade de manuseio.

A curcumina utilizada, para meio de comparação, é de origem chinesa, e possui um percentual de pureza de 74,57% conforme apresentado no Anexo A.

##### 3.1.2 Substrato têxtil

Para os experimentos foi utilizado tecido plano de composição 100% algodão (CO) cru com gramatura 157,8 g.m<sup>-2</sup> obtido por meio de doação pela empresa Cremer SA, e malha de trama de composição 84% poliamida (PA) e 16% elastano com gramatura 213,3g.m<sup>-2</sup> fornecida pela empresa OTL Oecksler Têxtil Ltda.

### 3.1.3 Reagentes químicos

Os reagentes utilizados foram álcool etílico 96°GL (etanol) para a extração e dessorção do corante, emulgador, dispersante, sequestrante de íons de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , carbonato de sódio, hidróxido de sódio 50% e peróxido de hidrogênio 50%, utilizados no pré-alveamento, e ácido acético para neutralizar a solução desta preparação.

### 3.1.4 Equipamentos e *software* utilizados

Na Quadro 2 são apresentados os equipamentos com seus respectivos modelos e *software* que foram utilizados nas análises e nos experimentos com a cúrcuma.

Quadro 2 – Equipamentos e *software* utilizados nas análises e nos experimentos com a cúrcuma

<b>Equipamento/<i>Software</i></b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
Balança analítica	Shimadzu	ATX
Espectrofotômetro de absorvância UV/visível	BEL Photonics	UV – M51
Espectrofotômetro de reflectância UV/Visível	Datacolor	500
Máquina de tingir em canecos aquecida com infravermelho	Texcontrol	TC-2200
Agitador orbital	New Lab	NL-343-01
Crockmeter	Kimak	CA – 11
<i>Software</i>	Statistica	13.5

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Preparação das amostras

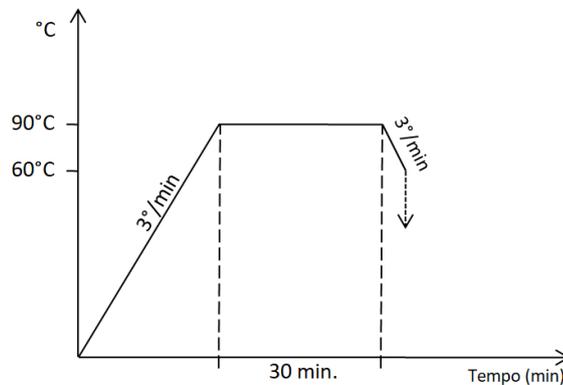
As amostras de CO e PA foram submetidas à etapa de preparação por meio do processo de pré-alveamento para obtenção da limpeza da fibra e qualidade ideal para posterior tingimento. Neste sentido, a Tabela 1 apresenta os insumos e sua respectiva quantidade utilizada no procedimento.

Tabela 1 – Aditivos químicos utilizados no processo de pré-alveamento em fibra de algodão e poliamida

Aditivos químicos	Quantidade (g.L <sup>-1</sup> )	
	Algodão	Poliamida
Carbonato de Sódio (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	-	2
Hidróxido de sódio (NaOH 50%)	3	-
Peróxido de hidrogênio (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50%)	3	-
Dispersante e sequestrante de íons de Ca <sup>2+</sup> e Mg <sup>2+</sup> Colorsperce C 500%	1,5	-
Emulgador Coloremulg EMG	2	2

O processo de pré-alveamento (denominado simplesmente de preparação) foi realizado em máquina de tingir em canecos, aquecida com infravermelho, em relação de banho de 1:20 e temperatura de 90 °C por 30 min, como apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama do processo de preparação da fibra de algodão e poliamida



Fonte: Elaborado pela autora

Posterior ao processo de preparação, as amostras foram neutralizadas em solução de ácido acético (1g/L) e secas em temperatura ambiente.

### 3.2.2 Varredura de absorção molecular na região UV/Visível

O espectro de absorção molecular na região UV/Vis de um corante mostra seus picos a comprimentos de onda predominantes, indicando o principal matiz. Neste sentido, para obtenção do comprimento de onda de absorção máxima ( $\lambda_{MÁX}$ ) da solução de extrato de cúrcuma em água (35 $\mu$ g/mL) e etanol (20 $\mu$ g/mL) (SAVALE, 2017) foi utilizado o espectrofotômetro UV/Vis, com leitura realizada entre 300 e 650 nm.

### 3.2.3 Preparação da solução corante

A obtenção da solução corante a partir da cúrcuma foi realizada utilizando o método de repouso (Método 1) baseado nos experimentos de Nwokonkwo (2020), e o método de agitação à 60 °C (Método 2) baseado nos experimentos de Sogi (2010) e Paulucci (2013).

As soluções de corantes foram preparadas antes do tingimento, pesando-se as quantidades de 1 g, 3 g e 5 g de cúrcuma e misturando cada amostra com 100 mL de álcool etílico (96°GL) (HAN, YANG, 2005; HASAN *et al.*, 2014).

No método 1, as soluções permaneceram em repouso durante 7 dias, e diariamente, alíquotas de 5 mL foram coletadas e submetidas a leituras em espectrofotômetro de absorbância.

No método 2, as soluções foram aquecidas a temperatura de 60 °C e submetidas a agitação em agitador orbital (70 rpm) durante 30 e 60 min. Após o processo, o conteúdo foi arrefecido até temperatura ambiente e filtrado em papel filtro (500 x 500 mm). Por fim, as amostras foram submetidas a leituras em espectrofotômetro de absorbância.

### 3.2.4 Curva padrão de calibração

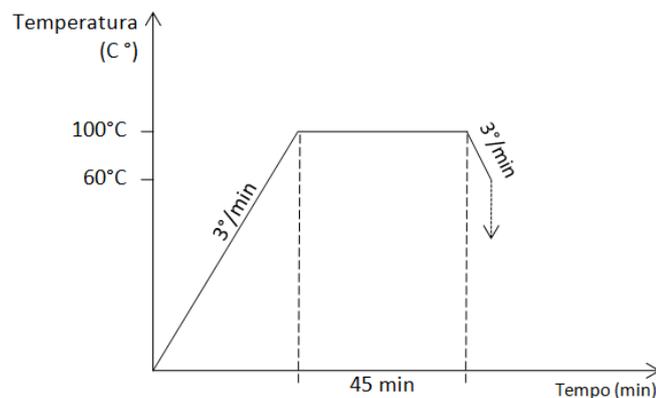
Para determinação do percentual aproximado de curcumina presente na cúrcuma utilizada nos experimentos, assim como a concentração de curcumina nos ensaios de extração, tingimento e dessorção, curvas padrão de calibração foram obtidas em um dos comprimentos de onda que apresentou maior absorbância, sendo a solução diluída conforme a necessidade para um nível adequado (2 – 20  $\mu$ g/mL)(SAVALE, 2017).

### 3.2.5 Processo de tingimento

Para a realização do tingimento, o extrato da cúrcuma foi aplicado na forma de solução de corante líquido (solução da extração etanólica) e todos os processos de tingimento foram realizados em máquina de tingimento em canecos aquecidos com infravermelho, caracterizando um processo de tingimento por esgotamento.

As amostras foram tingidas em tempo fixo de 45 min, pH 7 e 100°C (HASAN *et al.*, 2014; BHARDWAJ; DADSENA, 2017) conforme Figura 18, nas condições pré-estabelecidas. A massa de substrato tingida foi de 0,5 g e relação de banho 1:20.

Figura 18–Curva de tingimento



Fonte: Elaborado pela autora

Nos ensaios de tingimento da fibra de algodão e poliamida, utilizaram-se água destilada como solvente da solução de tingimento, e solução de extrato de cúrcuma em concentração de 100%, 150% e 200% s.p.m, concentrações estas definidas em ensaios preliminares. A Tabela 2 apresenta as variáveis do tingimento utilizadas.

Tabela 2 – Variáveis do tingimento com o extrato da cúrcuma para o algodão e poliamida

Extrato de cúrcuma (% s.p.m)	Solução corante (mL)	Água destilada (mL)	Teor médio de curcumina na solução de tingimento (mg)
100%	0,50	9,50	97,18±5,39
150%	0,75	9,25	158,03±13,86
200%	1,00	9,00	195,11±3,14

Após o tingimento, as amostras foram enxaguadas de forma manual com água destilada em temperatura de 50 °C para remoção do corante residual e secas em condições ambiente.

O percentual de esgotamento, que representa a quantidade de corante absorvida pelo tecido foi determinado por medições de absorbância das amostras líquidas em espectrofotômetro UV-VIS no comprimento de onda do corante (425 nm). Para o cálculo, foram realizadas as leituras de absorbância das amostras da solução de tingimento (amostra inicial) e amostra posterior ao processo de tingimento com o corante residual na solução de tingimento (amostra final), conforme Equação 21 (GONÇALVES *et al.*, 2020). Sendo, neste caso, desprezada a possível formação de corante hidrolisado eliminado no enxágue pós tingimento.

$$\% \text{ Esgotamento} = \frac{(\text{Inicial} - \text{Final})}{\text{Inicial}} \times 100 \quad (21)$$

Por meio da análise das variáveis de tingimento, para efeito de comparação, as amostras tingidas serviram como dados preliminares para avaliar a influência da proporção de corante no rendimento do tingimento. A partir disso, será estudado o mecanismo de tingimento com o extrato da cúrcuma nas diferentes fibras têxteis.

### **3.2.6 Avaliação de cor**

As alterações na tonalidade e intensidade de cor devido as variações nas condições de tingimento foram avaliadas por meio de leituras em espectrofotômetro de reflectância (400 – 700 nm), para a obtenção das coordenadas colorimétricas CIELab (Figura 12), assim como a força colorística (K/S) das amostras. A partir destes resultados, foi possível determinar também se as variações de processo apresentam vantagens significativas quando comparadas umas às outras.

### **3.2.7 Determinação da cinética de adsorção e isothermas de tingimento**

Por meio da cinética de adsorção é possível compreender o comportamento do corante em relação à fibra e o mecanismo de tingimento. Para a determinação da cinética, foram

utilizadas as amostras com condições de tingimento selecionadas no ensaio de tingimento anterior.

Para o estudo da cinética de adsorção, os tecidos foram colocados no caneco e introduzidos ao equipamento de tingimento, para então dar início ao processo de tingimento e contagem do tempo. Alíquotas do banho de tingimento foram coletadas em intervalos de 2 min nos primeiros 20 min, e 5 min de 20-45 min de tingimento para análise em espectrofotômetro (HAQUE *et al.*, 2018).

A fim de verificar o mecanismo de controle do processo de adsorção, os modelos cinéticos empregados foram os modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, conforme as Equações 2 e 4, sendo ajustados aos dados experimentais por meio do *software* Origin.

Já para a determinação do modelo isotérmico que melhor se ajusta ao processo, as soluções de tingimentos foram analisadas antes e depois do processo de tingimento por espectrofotometria UV-Vis. A curva foi construída a partir da análise da concentração inicial da curcumina em 50%, 100%, 150%, 200% e 250% s.p.m. e a concentração final da curcumina em relação ao tempo de tingimento (Figura 18).

Com os dados obtidos, foram calculados valores de  $C_e$  (concentração final de curcumina no banho), e  $q_e$  (quantidade de curcumina adsorvida no equilíbrio por unidade de massa de substrato), de acordo com o modelo Langmuir (Equação 5), Freundlich (Equação 6), e Nerst (Equação 7), utilizando o *software* Origin.

### 3.2.8 Determinação de parâmetros termodinâmicos

Os parâmetros termodinâmicos: variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ), variação de entalpia ( $\Delta H^\circ$ ) e variação de entropia ( $\Delta S^\circ$ ) foram determinados para as diferentes fibras por espectrofotometria UV-Vis. Os dados necessários para os cálculos dessas propriedades termodinâmicas (Equações 8, 9 e 10) foram obtidos a partir da análise da concentração inicial ( $C_o$ ) e final de curcumina ( $C_e$ ) em relação a temperatura do tingimento (Figura 18): 60°C, 80°C e 100°C.

### **3.2.9 Espectroscopia no Infravermelho por Transferência de Fourier (FTIR)**

A espectroscopia no infravermelho fornece evidências da presença de grupos funcionais na estrutura dos materiais devido a interação das moléculas ou átomos com radiação eletromagnética em um processo de vibração molecular (PAUL; GENESCÀ, 2013; RAMLOW, 2018).

O efeito do tingimento com o extrato de cúrcuma sobre as fibras de algodão e poliamida foi examinado pelo Espectrômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier em modo de Refletância Total Atenuada (ATR) da marca Frontier Perkin Elmer no comprimento de onda de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , no Laboratório de Análise Térmica e Espectroscopia (LTE) da UFSC, campus Blumenau.

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

Por meio da análise de Microscopia Eletrônica de Varredura foi possível obter a microfotografia da estrutura física da superfície das amostras de algodão e poliamida tingidas com o extrato de cúrcuma. Este ensaio foi realizado no Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Regional de Blumenau (FURB), utilizando o revestidor por pulverização de ouro Q150R–Quarum e microscópio eletrônico de varredura de bancada TESCAN.

### **3.2.11 Determinação da solidez**

Amostras tingidas em determinadas condições de processo foram submetidas aos testes de solidez a cor à lavagem, fricção, água e luz com o intuito de verificar a fixação do corante na fibra e o potencial de liberação da cúrcuma a partir dos têxteis tingidos.

O teste de solidez à lavagem obedeceu aos procedimentos descritos na norma ABNT NBR ISO 105-C06 - Ensaio de solidez da cor parte C06: Solidez da cor à lavagem doméstica, onde foi substituído o detergente padrão estabelecido pela norma por um detergente neutro comercial (SALVI, 2018). Os testes foram realizados em máquina de tingimento Texcontrol com tecido-testemunha 100% algodão alvejado e 100% poliamida purgada, a temperatura de 40°C por 30 min, conforme indicado pela norma no ciclo A1S.

O ensaio de solidez a fricção a seco e a úmido obedeceu aos procedimentos descritos na norma ABNT NBR ISO 105-X12 – Ensaio de solidez da cor parte X12: solidez da cor à fricção, realizado no equipamento Crockmeter da marca Kimak, que efetua o movimento de fricção linear de vaivém. Um tecido plano de 100% algodão alvejado foi utilizado como tecido-testemunha para a avaliação da transferência de cor.

O ensaio de solidez à água obedeceu aos procedimentos descritos na norma ABNT NBR ISO 105-E01 – Ensaio de solidez da cor à água. O ensaio consistiu na disposição da amostra entre dois tecidos-testemunha e imerso em água por 30 min. Após o tempo, foi retirado o excesso de água do corpo de prova, e o mesmo foi disposto entre duas placas de acrílico sob pressão aproximada de 12,5 kPa no dispositivo de ensaio. Por fim, o dispositivo foi mantido em estufa a 37°C por 4 h.

Após a secagem das amostras ao ar, a avaliação da alteração e transferência de cor das amostras submetidas aos testes de solidez foi realizada utilizando o espectrofotômetro UV/Vis Datacolor500.

O ensaio de solidez a luz foi realizado no Laboratório de Ensaio Físicos e Químicos Têxteis (LAFITE) no Senai em Brusque/SC e seguiu aos procedimentos descritos na norma ABNT NBR ISO 105-B02:2019 – Solidez da cor à luz artificial: Ensaio da lâmpada de desbotamento de arco de xenônio. Método 05 - Ciclo Exposição B com energia radiante de 98,97 kJ/m<sup>2</sup>, irradiância de 1,10 W/m<sup>2</sup>, temperatura no painel preto de 63°C e umidade relativa de 30% em um total de 25 h de ensaio. A avaliação da alteração de cor foi realizada utilizando escala de cinza (LT-007).

### **3.2.12 Ensaio de liberação da curcumina**

Os ensaios de liberação da curcumina a partir dos substratos têxteis foi baseado no trabalho de Marti *et al.* (2019) e foram realizados em um meio de diferentes proporções volumétricas de etanol para água (25%, 50%, 75% e 100% v/v) em triplicata. Amostras de algodão (0,10 g) e poliamida (0,20 g) tingidos foram imersas em recipientes contendo a solução de volume de 50 mL para o algodão e 75 mL para a poliamida, e dispostos em incubadora com agitação orbital à temperatura de 25 °C sob leve agitação controlada (100 rpm).

Em intervalos pré-determinados e crescentes, uma alíquota foi colhida para determinação da concentração de curcumina liberada a partir das amostras em

espectrofotômetro UV/Vis no comprimento de onda determinado (425 nm). Coletas e leituras foram realizadas até não haver mais variação da concentração.

#### 3.2.12.1 Modelagem matemática do processo difusivo da curcumina dos substratos têxteis

O mecanismo de liberação da curcumina a partir dos substratos têxteis em contato com o etanol foi avaliado pelas Equações 14, 15 e 16.

#### 3.2.13 Ensaio antimicrobiano

Para avaliar o potencial antimicrobiano dos substratos têxteis tingidos com o extrato da cúrcuma, foram realizados ensaios antimicrobianos quantitativos baseados na adaptação da norma ASTM E2149 - Método de Teste Padrão para Determinação da Atividade Antimicrobiana de Agentes Antimicrobianos Imobilizados sob Condições Dinâmicas. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Microbiologia de Alimentos II no Centro de Ciências Agrárias da UFSC, utilizando as bactérias *Escherichia coli* ATCC 25922 e *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, doadas pela Coleção de Culturas de Bactérias de Interesse em Saúde, Fundação Oswaldo Cruz, Ministério da Saúde, Rio de Janeiro.

Os microrganismos foram mantidos a -20 °C em criotubos (TPP, Suíça) contendo 1 mL de caldo nutriente (NB, Acumedia, Brasil) e glicerol a 10% (v/v) (Labsynth, Brasil). A reativação das cepas foi realizada transferindo 100 µL da cultura estoque para 5 mL Brain Heart Infusion Broth (BHI – Oxoid®, GB) e incubação por 24 horas a 37±2°C. Foi realizada a inoculação pelo método de estriamento em Plate Count Ágar (PCA, Kasvi, Brasil), seguido de incubação nas mesmas condições. A identidade da espécie foi verificada regularmente por estrias em Eosin Methyl Blue Agar (EMB, HiMedia, EUA) e Baird Parker Agar (BP, MicroMed®, Brasil), respectivamente. As culturas de trabalho foram preparadas pela diluição de uma alíquota do subcultivo em água peptonada 0,1% (Kasvi, Brasil) para obter uma concentração de 10<sup>-7</sup>UFC.mL<sup>-1</sup>, com turbidez equivalente a 0,5 na escala de McFarland. Diluição seriada foi feita para verificar a densidade do inóculo por plaqueamento em PCA.

As amostras têxteis (CO<sub>TINGIDO</sub> e PA<sub>TINGIDO</sub>) e as amostras controle (CO<sub>ALVEJADO</sub> e PA<sub>ALVEJADO</sub>), foram previamente cortadas (15 mm x 15 mm) e esterilizadas por radiação ultravioleta (UV) por 30 min. A solução de tingimento na concentração (1,77 mg mL<sup>-1</sup>) foi esterilizada por filtração em membrana de politetrafluoretileno (PTFE) 0.22 µm (Allcrom,

Brasil), e foi utilizada como controle positivo do ativo impregnado nas amostras têxteis. Os controles laboratoriais utilizados foram solução de ciprofloxacino 0,01% e a cultura microbiana sem a presença de agentes inibidores.

Frascos contendo 50 mL de Caldo Nutriente (CN, Neogen®, EUA) previamente equilibrados na temperatura de 35 °C foram inoculados com as amostras testes, os controles e incubados a 35±1 °C por 1 h e 24 h em incubadora (Quimis M226M, Brasil). As amostras foram diluídas em série e plaqueadas em ágar EMB e BP pelo método de gota em duplicata, seguidas de incubação a 35±1 °C por 24 h para a contagem do crescimento microbiano. Os resultados foram expressos em média de UFC/mL. A porcentagem de redução/aumento bacteriano foi determinada de acordo com a Equação 22.

$$\text{Fator de redução|aumento \% (UFC.mL}^{-1}\text{)} = \frac{(B - A)}{B} * 100 \quad (22)$$

Onde  $A$  indica o número de UFC mL<sup>-1</sup> para o frasco contendo as amostras avaliadas, após o tempo de contato (1 h e 24 h) e  $B$  representa o número de UFC mL<sup>-1</sup> para o inóculo no tempo zero.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos, inicialmente, os resultados obtidos na preparação das fibras e as diferentes metodologias de extração do corante. Definida o melhor método de extração, são apresentados os resultados de tingimento, ensaios de liberação e caracterizações complementares das amostras de algodão e poliamida por MEV, FTIR e testes de solidez. Por último, são apresentados os resultados da atividade antimicrobiana *in vitro* das amostras.

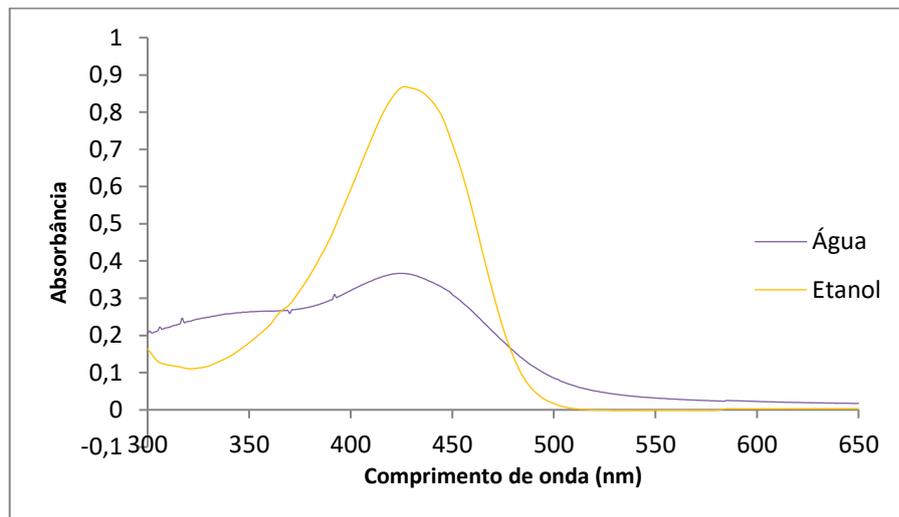
### 4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras de algodão e poliamida preparadas pelo processo de pré-alveamento, método este descrito na Seção 3.2.1, apresentaram uma base limpa e clara necessária para a etapa posterior tingimento. Mostrando assim que os produtos auxiliares utilizados no processo de preparação foram eficientes no auxílio à limpeza e branqueamento dos substratos.

## 4.2 VARREDURA DE ABSORÇÃO MOLECULAR NA REGIÃO UV/VISÍVEL

Para a obtenção do comprimento de onda do extrato da cúrcuma em água ( $35\mu\text{g mL}^{-1}$ ) e etanol ( $20\mu\text{g mL}^{-1}$ ), a leitura no espectrofotômetro de absorbância foi realizada entre 300 e 650 nm e obteve-se uma banda máxima de absorção em 425 nm para ambos os solventes (Figura 19), comprimento de onda característico da curcumina, e o mesmo encontrado por Himesh *et al.*(2011) e Vannonh *et al.*(2016). Assim, pode-se afirmar que os solventes utilizados não interferem no comprimento de onda obtido com o extrato da cúrcuma utilizado, sendo esta informação relevante para posteriores análises do processo de tingimento têxtil.

Figura 19 – Espectro eletrônico de absorção no UV-Vis do extrato de cúrcuma em água ( $35\mu\text{g mL}^{-1}$ ) e etanol ( $20\mu\text{g mL}^{-1}$ ) com absorbância máxima em  $\lambda = 425\text{ nm}$



## 4.3 SOLUÇÃO CORANTE OBTIDO PELA CÚRCUMA

A extração da curcumina a partir da cúrcuma em pó foi realizada em etanol pelo método de repouso e pelo método de agitação e temperatura de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  como especificado na Seção 3.2.3, e os resultados são apresentados na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 – Concentração de curcumina obtida pelo método de repouso em etanol com 1 g, 3 g e 5 g de cúrcuma no decorrer de 7 dias

Dia	Concentração de curcumina (g/L)		
	1 g	3 g	5 g
1	29,16±2,02	50,82±4,98	53,91±5,62
2	39,03±7,47	65,10±6,27	61,42±6,80
3	27,25±2,84	63,63±6,13	81,90±4,86
4	29,01±1,55	74,68±2,46	98,39±4,96
5	36,08±3,75	71,44±3,70	119,31±14,36
6	35,64±3,57	88,08±11,35	128,74±5,17
7	37,56±1,92	79,25±11,56	120,78±13,18

Tabela 4 – Concentração de curcumina obtida pelo método de extração com agitação à 60 °C em etanol com 1 g, 3 g e 5 g de cúrcuma em 30 e 60 min

Tempo (min)	Concentração de curcumina (g/L)		
	1 g	3 g	5 g
30	20,77±2,89	36,67±5,97	82,34±4,42
60	64,22±2,08	160,26±12,47	273,69±15,87

Ensaio preliminares utilizando água destilada como solvente pelas mesmas técnicas foram realizados, entretanto, observou-se a dificuldade de solubilidade da cúrcuma em água (REDDY *et al.*, 2013). Apesar da solubilidade ser facilitada pela agitação e aumento da temperatura (Método 1), os valores de concentração de extrato obtidos foram expressivamente inferiores à extração alcoólica, na qual a cúrcuma é instantaneamente solubilizada. Resultados similares foram encontrados por Sachan e Kapoor (2007), onde compararam diferentes metodologias (aquoso, etanol e *spray drying*) em evaporador a vácuo para extrair material corante da cúrcuma. Neste estudo, os mesmos obtiveram rendimento máximo utilizando etanol, seguido pela água e pelo método *spray drying*.

Hasan *et al.* (2014) ao realizar a extração do corante a partir da cúrcuma pelo método Soxhlet utilizando diferentes solventes, também obtiveram melhor resultado de extração de curcuminóides para o metanol e etanol, seguido pela acetona e água em menores quantidades. Por este motivo, a extração com etanol foi preferível nesta pesquisa. Vale ressaltar que a extração dos curcuminóides em meios alcoólicos não inibem as ações bioativas como anti-inflamatória, anticancerígeno, antiprotzário e antibacteriano (CHATTOPANDHYAYAM *et al.*, 2004).

Ao comparar os valores de concentração de curcumina do extrato obtidos pelos diferentes métodos, o método de agitação à 60 °C em 60 min apresentou valores superiores ao método de repouso, mostrando que com o aumento de temperatura e agitação, a solubilidade da cúrcuma é facilitada. Em relação ao método de repouso ao decorrer de 7 d, a concentração não apresentou diferença relevante a partir do quinto dia de experimento para todas as amostras como apresenta a Tabela 3.

Quando comparados às diferentes quantidades iniciais de cúrcuma pesada (1 g, 3 g e 5 g), observou-se, em ambas as técnicas, que com a utilização de apenas 1 g de cúrcuma obteve-se uma solução de elevada concentração e de coloração amarelo vibrante. Com o aumento da massa, 3 g e 5 g, houve um aumento expressivo da concentração e da intensidade de cor, mesmo que não proporcional.

Neste sentido, com base nos resultados obtidos, optou-se para os ensaios de tingimento utilizar 5 g de cúrcuma extraídos em etanol, pelo método de agitação à 60 °C e 60 min.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CURCUMINA

Por meio da curva de calibração da curcumina e do extrato de cúrcuma em etanol (APÊNDICE A), determinou-se o percentual estimado de curcumina presente na cúrcuma em pó, utilizada nos experimentos em  $2,79 \pm 0,19\%$ . Esse resultado está de acordo com a literatura que registra valores de 2 a 8% (CECILIO FILHO, 2000; SACHAN; KAPOOR, 2007).

#### 4.5 PROCESSO DE TINGIMENTO

Os resultados do percentual de esgotamento assim como a quantidade de curcumina presente na fibra de algodão e poliamida tingidas pelo método de esgotamento com o extrato da cúrcuma estão apresentados na Tabela 5.

No presente trabalho, buscou-se como prioridade a maior quantidade de curcumina na fibra, visando uma maior descoloração em ensaios posteriores. Entretanto, a qualidade no processo de tingimento é essencial para se estudar os fenômenos envolvidos nesta etapa. Neste sentido, a análise de cor e os ensaios de solidez realizados servirão também para entender a interação do corante com a fibra assim como a resistência do corante em condições estabelecidas (Sessão 4.8).

Tabela 5 – Percentual de esgotamento e massa de curcumina em mg por grama de fibra de algodão e poliamida em diferentes concentrações de solução corante (100, 150 e 200% s.p.m.)

<b>Fibra</b>	<b>Concentração de solução corante (% s.p.m.)</b>	<b>%Esgotamento</b>	<b>Curcumina (mg.g<sup>-1</sup> fibra)</b>
CO	100	64,62±3,58	125,58±11,73
	150	61,78±2,05	181,65±3,17
	200	54,18±2,13	211,40±10,70
PA	100	98,66±0,41	191,75±11,23
	150	98,55±0,67	295,09±1,92
	200	97,80±0,22	381,62±5,52

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, observa-se que o percentual de esgotamento foram próximos para as diferentes concentrações na mesma fibra. Entretanto, a fibra de poliamida apresentou esgotamento superior a 50% em relação ao algodão. Assim como, a quantidade em mg de curcumina.g<sup>-1</sup> fibra de poliamida que é superior a 50% quando comparado com a quantidade de curcumina presente na fibra de algodão, este fato justifica-se pela afinidade iônica natural da poliamida com o corante da cúrcuma.

Ainda assim, quando comparada à concentração da solução corante inicial, observa-se que quanto maior a concentração inicial, maior quantidade de curcumina presente na fibra, quase que de forma proporcional. Estes resultados são positivos quando se deseja uma maior quantidade de curcumina no tecido visando a posterior dessorção.

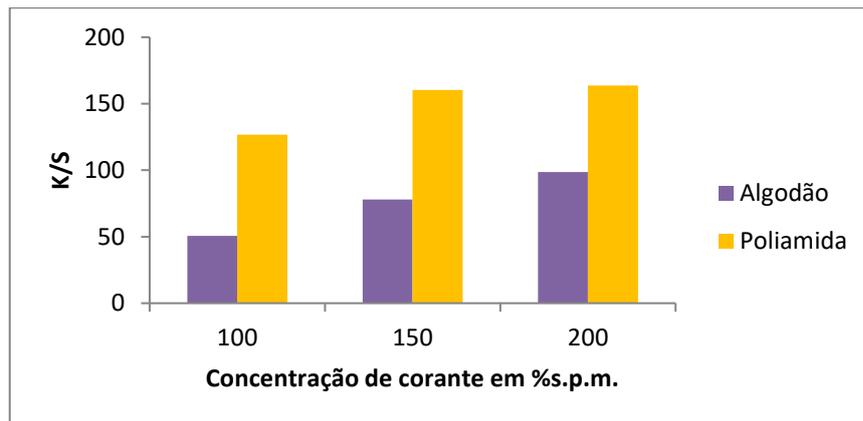
É possível observar que tanto para a fibra de algodão quanto para a fibra de poliamida a proporção de massa de curcumina por grama de fibra para a concentração de 150% foi menor do que para 200% s.p.m., mostrando que o ponto de saturação de ambas as fibras está próximo, ou seja, ainda existem alguns sítios ativos nas fibras para o recebimento de corante. Entretanto, os resultados mostram uma boa adsorção do corante pelas fibras e uma quantidade superior de curcumina presente nas fibras com 200% s.p.m., sendo esta variável selecionada para os demais ensaios.

Apesar da estética colorimétrica não ser o ponto principal desta pesquisa, a cor destaca-se como dado importante a se levado em consideração quando da realização estudos futuros, como aplicações relacionados à área de moda, por exemplo, e/ou para fins comerciais, devido a sua cor intensa e apelo sustentável.

A força colorística (K/S) do algodão e da poliamida tingidos são dependentes da concentração do extrato da cúrcuma como apresenta a Figura 20. Observa-se que a força da cor expressa em K/S aumentou com o aumento da concentração inicial de corante. Para a fibra de

algodão, observa-se pelo K/S que a fibra ainda está apresentando maior intensidade de cor com a absorção de corante, diferentemente da fibra de poliamida, que apesar de continuar absorvendo corante, não revela mais aumento da intensidade de cor, mostrando saturação no que diz respeito a esse aspecto.

Figura 20 – Efeito da concentração do extrato da cúrcuma na força colorística (K/S) na fibra de algodão e poliamida



Quando observadas as coordenadas de cor das fibras tingidas com o extrato da cúrcuma em diferentes concentrações, todas as amostras apresentaram coloração amarelada intensa, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6– Coordenadas de cor e cor da fibra de algodão e poliamida tingidas com extrato de cúrcuma

Fibra	Concentração de solução corante (% s.p.m.)	L*	a*	b*	Cor
CO	100	94,33	7,09	71,60	
	150	91,15	10,78	77,05	
	200	90,85	13,57	80,35	
PA	100	81,31	8,17	80,82	
	150	78,10	11,09	79,95	
	200	77,72	11,52	79,84	

A tonalidade do algodão e da poliamida tingidos é amarelada, e quando a porcentagem de corante é aumentada, os tecidos apresentaram coloração levemente menos luminosa e mais

avermelhados. Neste sentido, podemos relacionar a concentração inicial do extrato com o incremento de cor para finalidades comerciais, por exemplo.

Uma variável relevante analisada em ensaios preliminares referem-se à utilização do cloreto de sódio (NaCl) no tingimento do algodão, agindo de maneira a quebrar a barreira eletrostática existente, melhorando a afinidade entre corante e fibra (PERKINS, 1996). Em relação a utilização de 50 g/L do eletrólito no tingimento do algodão, o mesmo não apresentou diferença expressiva quanto ao percentual de curcumina na fibra, justificando a não utilização do eletrólito no tingimento. Entretanto, é necessário salientar que a utilização do mordente no tingimento com a cúrcuma altera fortemente a tonalidade da cor e que para a utilização em escala industrial, o mordente deverá ser levado em consideração desde o desenvolvimento inicial da cor (PICCOLI *et al.*, 2008).

#### **4.5.1 Cinética de Adsorção**

Os dados cinéticos obtidos da adsorção do extrato da cúrcuma no presente estudo foram analisados usando o modelo de pseudo-primeira ordem (Equação 2) bem como o modelo cinético de pseudo-segunda ordem (Equação 4). O efeito do tempo de contato na adsorção do extrato da cúrcuma no algodão e poliamida é apresentado na Figura 21 e na Figura 22.

A Figura 21 representa os resultados nos primeiros 20 min, no entanto, o tempo necessário para atingir o equilíbrio na fibra de poliamida foi 21 min, tempo superior quando comparado com a fibra de algodão (18 min), o que pode ser visto na Figura 22.

Figura 21 – Efeito do tempo de contato na adsorção do extrato da cúrcuma na fibra de algodão e poliamida respectivamente (0-20 min)

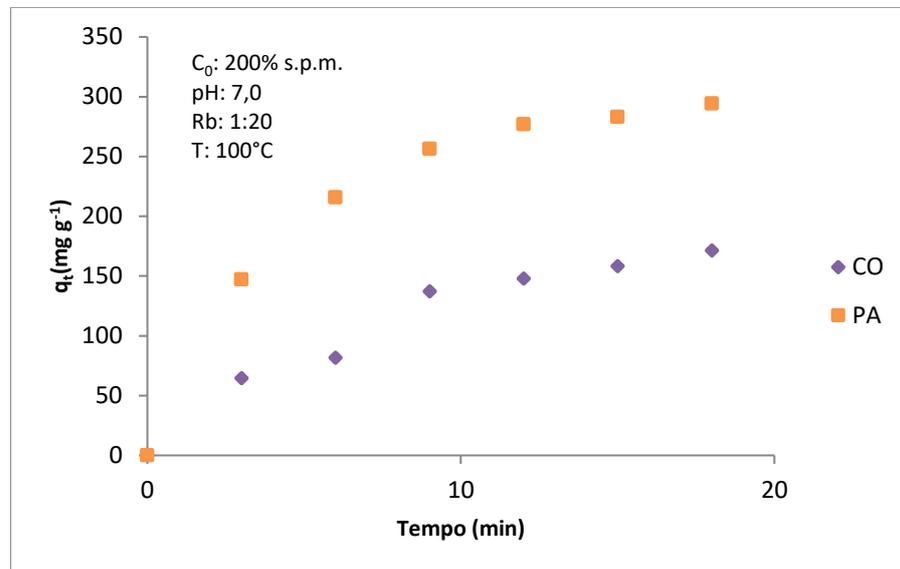
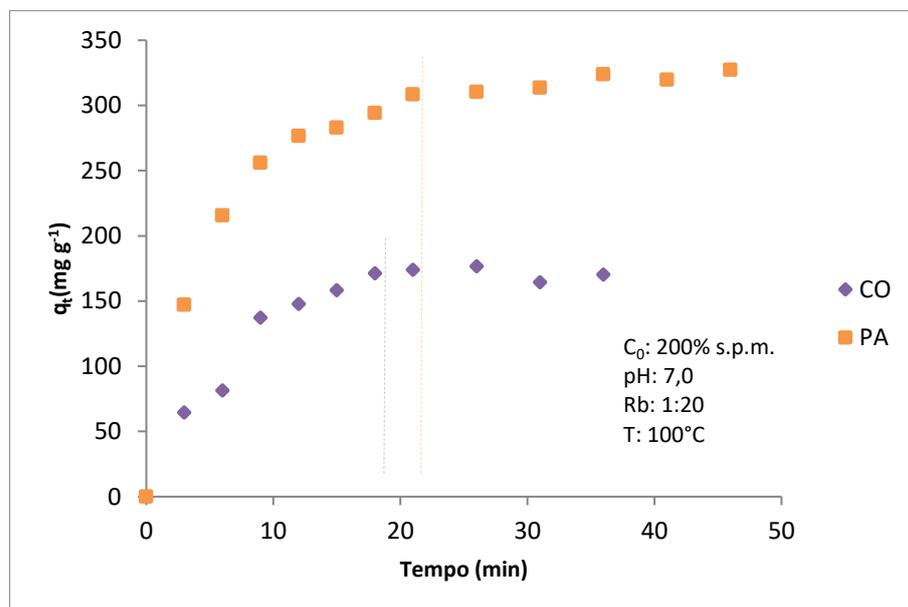


Figura 22 – Efeito do tempo de contato na adsorção do extrato da cúrcuma na fibra de algodão e poliamida respectivamente (0-50 min.)



Verificou-se que a taxa de adsorção do corante na fase inicial foi demasiadamente rápida, abaixo de 25 min, e diminuindo gradualmente com o tempo até manter-se constante e obtendo o equilíbrio. De acordo com Jiwalak *et al.* (2010), a velocidade de adsorção elevada no período inicial pode ser justificada pelo elevado número de locais de adsorção livres disponíveis na fibra nesta fase. E com o passar do tempo, o gradiente de concentração de corante

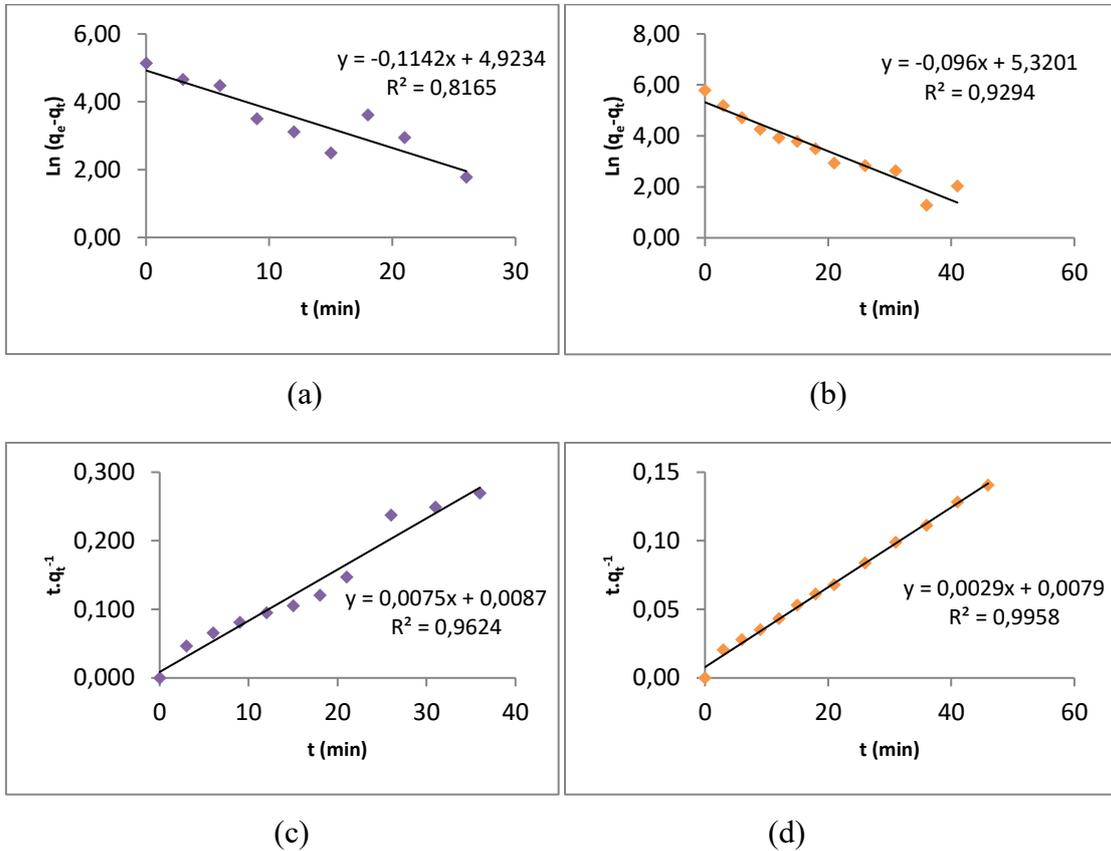
na superfície diminui devido ao aumento de ocupação dos sítios por moléculas de corante. Este comportamento e tempo de equilíbrio com fibras celulósicas estão de acordo com o trabalho de Haque *et al.* (2018a) e Haque *et al.* (2018b).

A quantidade máxima de corante retida no tempo de equilíbrio foi de 174,02 mg.g<sup>-1</sup> de fibra e 310,38 mg.g<sup>-1</sup> de fibra para o tecido de algodão e poliamida, respectivamente. Como já mencionado, a poliamida absorve mais corante devido ao maior número de grupos funcionais em sua superfície. Esse fato pôde ser observado até mesmo nos primeiros minutos de tingimento, na qual, a concentração adsorvida é maior para a poliamida. Entretanto, observa-se também o maior tempo para o alcance do equilíbrio para a fibra de poliamida quando comparado com a fibra de algodão devido à natureza hidrofóbica e cristalina e até mesmo a estrutura de tecido mais fechada dificultando assim a adsorção e difusão do corante.

O ajuste linear dos modelos de pseudo-primeira ordem e de pseudo-segunda para o tingimento com o corante natural da cúrcuma é apresentado na Figura 23. Observou-se que o modelo cinético de pseudo-segunda ordem foi o modelo que melhor descreveu a adsorção do corante da cúrcuma para ambas as fibras. Este resultado está de acordo com o trabalho de Haque *et al.* (2018a) que investigaram o comportamento do tingimento com a curcumina em tecido de algodão, e os dados experimentais mostraram um bom ajuste linear com o modelo cinético de pseudo-segunda ordem ( $R^2 > 0,99$ ). Resultados semelhantes também para a pesquisa de Haque *et al.* (2018b) utilizando o corante da curcumina em fibra de modal, que também é uma fibra de celulose (regenerada) e observaram um melhor ajuste ao modelo de pseudo-segunda ordem ( $R^2 = 0,999$ ), assim como Zamri *et al.* (2017) ao tingir fios de bambu com curcumina ( $R^2 = 0,995$ ).

Apesar de não existir nenhum registro na literatura sobre o estudo cinético da curcumina na fibra de poliamida, um estudo cinético na fibra com o corante natural da conchonilla foi estudado por Mousa *et al.* (2018) demonstrando uma melhor correlação com o modelo de pseudo-segunda ordem ( $R^2 = 0,990$ ) quando comparado com o modelo cinético pseudo-primeira ordem ( $R^2 = 0,961$ ).

Figura 23 – Ajuste linear das cinéticas de adsorção de Pseudo-primeira ordem para a fibra de algodão (a) e poliamida (b), e Pseudo-segunda ordem para a fibra de algodão (c) e poliamida (d) obtidas pelo tingimento com o extrato da cúrcuma



A Tabela 7 apresenta os resultados quantitativos dos ajustes. Ao comparar os dois modelos, observa-se que as quantidades de corante experimentalmente obtidas ( $q_{e,exp}$ ) concordam com o  $q_e$  ( $q_{e,cal}$ ) do modelo de pseudo-segunda ordem para ambas as fibras. Além disso, o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,962 e 0,995 para o algodão e poliamida respectivamente, que é superior ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem.

Tabela 7 – Comparação dos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem para a cinética do tingimento do algodão e poliamida com o extrato da cúrcuma

Fibra	$q_{e,exp}$ (mg.g <sup>-1</sup> )	Modelo de pseudo-primeira ordem		
		$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	$q_{e,cal}$ (mg.g <sup>-1</sup> )	$R^2$
CO	174	0,11±0,02	101,01±3,42	0,816
PA	310	0,09±0,00	213,41±29,33	0,929
Fibra	$q_{e,exp}$ (mg.g <sup>-1</sup> )	Modelo de pseudo-segunda ordem		
		$k_2$ (g fibra. mg corante <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	$q_{e,cal}$ (mg.g <sup>-1</sup> )	$R^2$
CO	174	3,83E-3±1,25E-3	155,09± 42,55	0,962
PA	310	1,06E-3±6,1E-5	344,82±0,00	0,995

Os dados mostram que embora a cinética de adsorção seja um processo de primeira ordem no estágio inicial para a fibra de algodão ( $t < 20$  min), segue a cinética de segunda ordem em tempos mais longos ( $t > 25$  min), confirmando com os experimentos de Haque (2018a).

Portanto, os dados apresentados neste estudo sugerem que o mecanismo de adsorção do processo de tingimento natural com a cúrcuma tanto na fibra de algodão quanto na fibra de poliamida é regido pelo modelo cinético de pseudo-segunda ordem, indicando que o mesmo é controlado pelo processo de quimissorção, uma troca de elétrons entre sítios específicos da superfície do tecido e as moléculas do corante, gerando uma ligação química como força covalente e troca iônica (AUGUSTO, 2015; ZAMRI *et al.*, 2017). Entretanto, nem sempre a alteração é completa no sentido das ligações químicas comuns (covalente ou iônico), podendo ocorrer somente uma alteração ou deformação parcial dos orbitais (SCREMIN, 2015).

#### 4.5.2 Isotermas de adsorção

Para o processo de adsorção, os modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich foram aplicados para interpretar os dados experimentais de adsorção. Os parâmetros de regressão para o modelo de Langmuir e Freundlich para o tingimento do algodão e poliamida são mostrados na Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Parâmetros dos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich para o tingimento da fibra de algodão com o extrato da cúrcuma

Isoterma	Parâmetros	Temperatura (°C)		
		60	80	100
Langmuir	$q_{max}$ (mg.g <sup>-1</sup> CO)	268,81±24,94	265,95±87,07	237,52±56,00
	$k_L$ (L.g <sup>-1</sup> CO)	3,32E-04±5,00E-5	2,32E-04±1,00E-4	3,00E-05±4,00E-5
	$R_L$	0,917	0,926	0,876
	$R^2$	0,991	0,971	0,775
Freundlich	$k_F$ (L.g <sup>-1</sup> CO)	1,76±0,17	0,63±0,10	0,11±0,14
	$n$	0,52±0,01	0,65±0,02	0,92±0,24
	$R^2$	0,998	0,986	0,778

Tabela 9 – Parâmetros dos modelos isotérmicos de Langmuir e Freundlich para o tingimento da fibra de poliamida com o extrato da cúrcuma

Isoterma	Parâmetros	Temperatura (°C)		
		60	80	100
Langmuir	$q_{max}$ (mg.g <sup>-1</sup> PA)	1771,46±653,03	1505,84±756,57	1345,18±239,48
	$k_L$ (L.g <sup>-1</sup> PA)	1,40E-04±5,00E-05	3,60E-04±3,00E-04	4,60E-04±1,30E-04
	$R_L$	0,796	0,651	0,616
	$R^2$	0,993	0,981	0,991
Freundlich	$k_F$ (L.g <sup>-1</sup> PA)	0,19±0,02	0,45±0,27	0,81±0,37
	$n$	1,05±0,02	0,98±0,08	0,78±0,04
	$R^2$	0,984	0,971	0,972

Observa-se que para a fibra de algodão, o modelo de Freundlich se adequou melhor, apresentando um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) superior ao coeficiente de correção do modelo de Langmuir para todas as temperaturas.

Segundo Andia (2009), o modelo de Freundlich admite uma distribuição logarítmica de sítios ativos, constituindo um procedimento válido quando não existe uma interação considerável entre as moléculas de adsorbato. A interação entre a fibra e o corante é fraca, pois possuem a mesma polaridade. Neste caso, as ligações entre corante-fibra são por pontes de hidrogênio e por forças de Van der Waals, comum entre corantes diretos e fibras celulósicas.

Este modelo de isoterma ainda admite a possibilidade de uma adsorção em multicamadas, que segundo a teoria de BET (BRUNAUER; EMMETT; TELLER,1938), uma camada tem a capacidade de produzir sítios de adsorção gerando a deposição de uma camada sobre a outra. Assim, a adsorção de corante na fibra não é limitada por sítios específicos de adsorção e a fibra não se torna saturada com o corante.

Ao observar os parâmetros do modelo isotérmico de Freundlich para a fibra de algodão, é evidente que a adsorção é influenciada pela temperatura. Apesar do fator de heterogeneidade ( $n$ ) apresentar valores mais elevados com o aumento de temperatura, o mesmo foi inferior a unidade para as temperaturas de 60 e 80°C, indicando que a adsorção nestas temperaturas não é favorável. Na temperatura de 100°C, observa-se um possível fator de heterogeneidade superior a unidade, indicando que com o aumento de temperatura, há o aumento de intensidade de adsorção, tornando a adsorção do algodão favorável. Valores de  $n$  próximos da unidade indicam a formação de uma monocamada, seguindo pela formação de multicamadas quando expressa por valores mais elevados que um (GIACOMINI, 2014). Neste caso, o valor de  $n = 0,927 \pm 0,243$  para a temperatura de 100°C, indica a possibilidade de que nesta temperatura ocorre maior formação de camadas múltiplas.

Os valores da constante de equilíbrio ( $K_F$ ) também são influenciados pela temperatura, reduzindo seu valor com o aumento da temperatura, indicando há redução na capacidade de adsorção do adsorvente com o aumento da temperatura.

Para a poliamida, diferentemente do algodão, o modelo de isoterma que apresentou fator de correlação ( $R^2$ ) superior foi o modelo de Langmuir, com valores superiores a 0,981 para todas as temperaturas.

Segundo Andia (2009), o modelo de Langmuir baseia-se na hipótese de que à medida que mais moléculas de corante são adsorvidas, há uma distribuição uniforme formando uma monocamada recobrimdo toda a superfície. Assume-se, neste caso, que a adsorção é monomolecular, ou seja, as moléculas de corante são adsorvidas sobre um número fixo e definido de sítios ativos, e a superfície é energeticamente homogênea.

É sabido que no modelo de Langmuir, o processo de quimissorção é predominante e o corante e a fibra interagem fortemente por possuírem polaridade oposta e/ou afinidade específica devido a presença de sítios limitados da fibra (SALEM, 2010). Por outro lado, não é possível descartar a possibilidade da formação de camadas múltiplas, características do modelo de Freundlich que provavelmente acontece por ligações de hidrogênio e forças de Van der Waals.

A adsorção do corante da cúrcuma na poliamida também é influenciada pela temperatura. Apesar dos valores expressivos de  $q_{max}$  não sofrerem tanta interferência devido a variação da temperatura, o parâmetro  $R_L$  mostrou redução com o aumento da temperatura, entretanto apresentou valores superiores a zero e inferiores a unidade, indicando uma adsorção

favorável. A constante de adsorção  $K_L$ , por outro lado, apresentou aumento em seus valores com o aumento da temperatura, mostrando afinidade do corante em relação aos sítios de ligação.

Como observado, tanto para o algodão quanto para a poliamida, os ajustes da isoterma de Freundlich e Langmuir se adequaram bem ao processo de tingimento com o extrato da cúrcuma, apresentando valores de correção próximos da unidade. O modelo isotérmico de Nernst também apresentou bons ajustes para ambas as fibras, com fator de correlação elevado, mas inferior as isotermas de Freundlich e Langmuir.

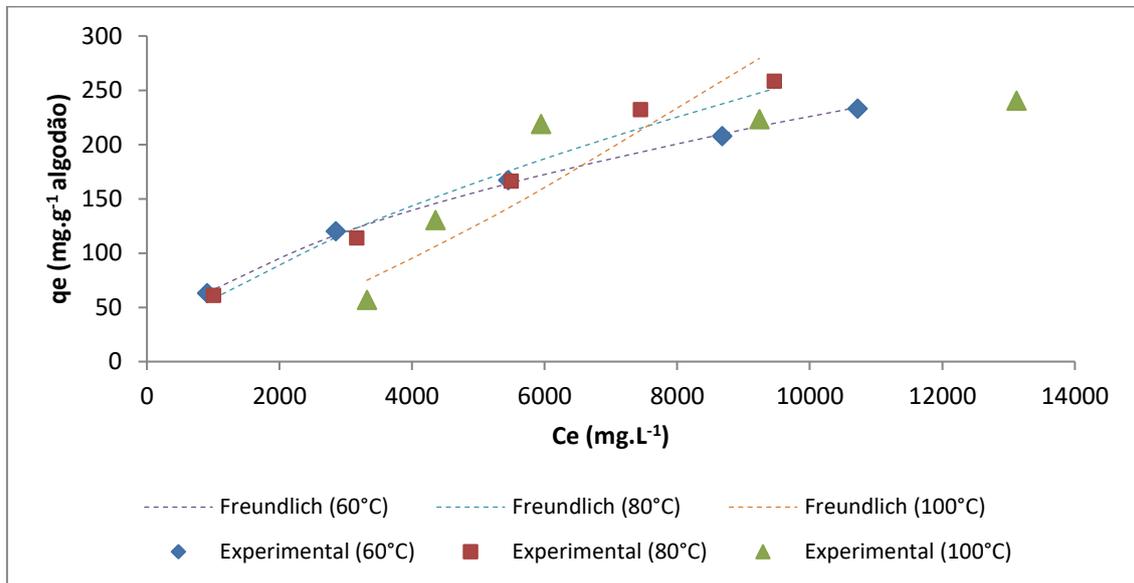
Embora não tenham sido encontrados na literatura pesquisas relacionadas ao estudo isotérmico com a cúrcuma para a fibra de algodão e poliamida, é possível fazer uma analogia à adsorção da cúrcuma em outras fibras, como observado por Zamri *et al.* (2017) que ao investigar o mecanismo de tingimento com o corante da cúrcuma em fio de bambu, observaram que o processo de adsorção se adequou melhor ao modelo cinético de Freundlich ( $R^2=0,975$ ).

Em relação à fibra de algodão, Pratumyot *et al.* (2019) ao tingir algodão com o corante extraído de resíduos de folhas de chá verde, observaram que a adsorção apresentou melhor fator de correlação (0,997) para o modelo de Langmuir. Entretanto, o estudo de Hajiet *al.* (2020) para o tingimento de algodão reticulado com ácido cítrico com corante natural catiônico se adequou melhor ao modelo de Freundlich.

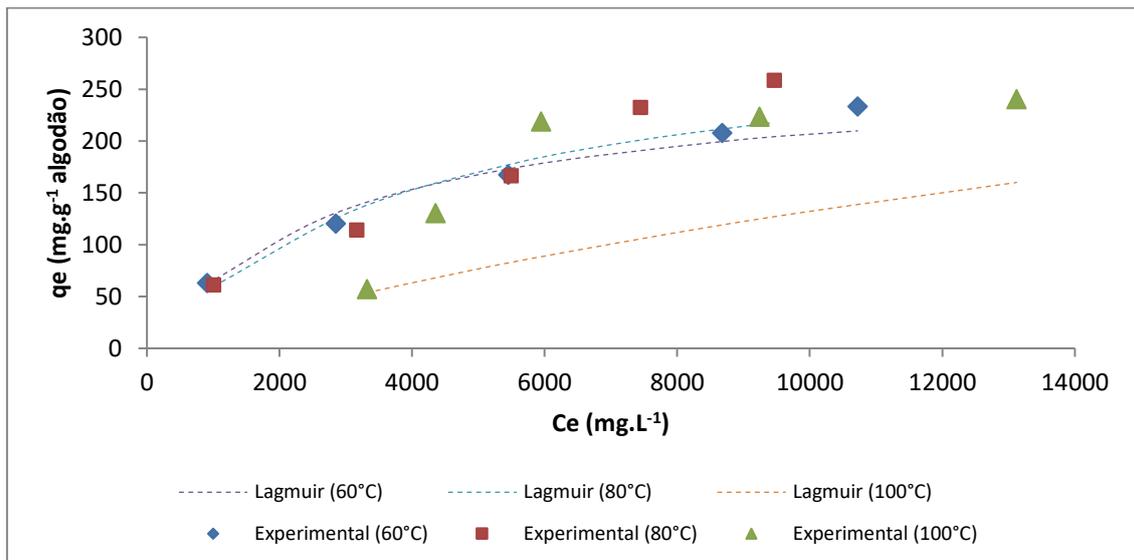
Para a fibra de poliamida, Sadeghi-kiakhani *et al.* (2018) ao utilizarem o corante natural de cochonilha observaram melhor adequação ao modelo de adsorção de Nernst, assim como Sadeghi-kiakhani, (2015) usando *rubiatictorium* na fibra de poliamida. Por outro lado, Gulrajani (1999) ao tingir em poliamida e poliéster com o corante de urucum, o mesmo encontrou elevados valores para os fatores de correção para o modelo isotérmico de Langmuir e Freundlich afirmando que no caso da poliamida, o corante pode estar sendo sorvido por mais de um mecanismo, no entanto, os dados indicaram que o mecanismo predominante é o mecanismo de Langmuir.

Para melhor visualização, na Figura 24 e 25, são apresentados os ajustes não-lineares dos dados experimentais para o modelo da isoterma de Freundlich e Langmuir do tingimento com o corante natural da cúrcuma estudado nas fibras de algodão e poliamida nas temperaturas de 60, 80 e 100°C.

Figura 24 – Isotermas de adsorção não linear do modelo de Freundlich (a) e Lagmuir (b) para a fibra de algodão

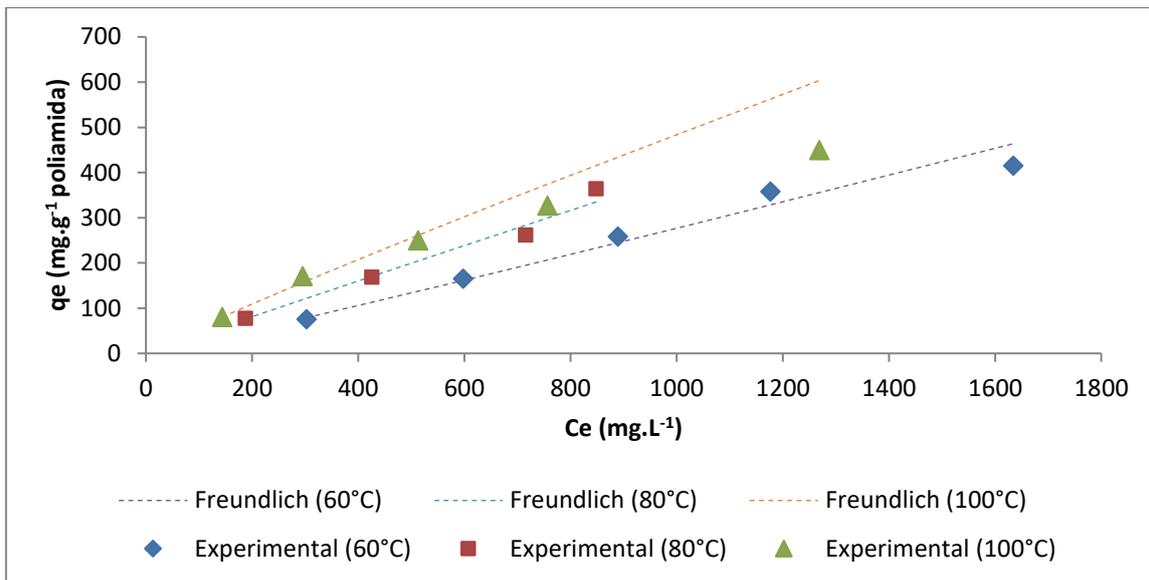


(a)

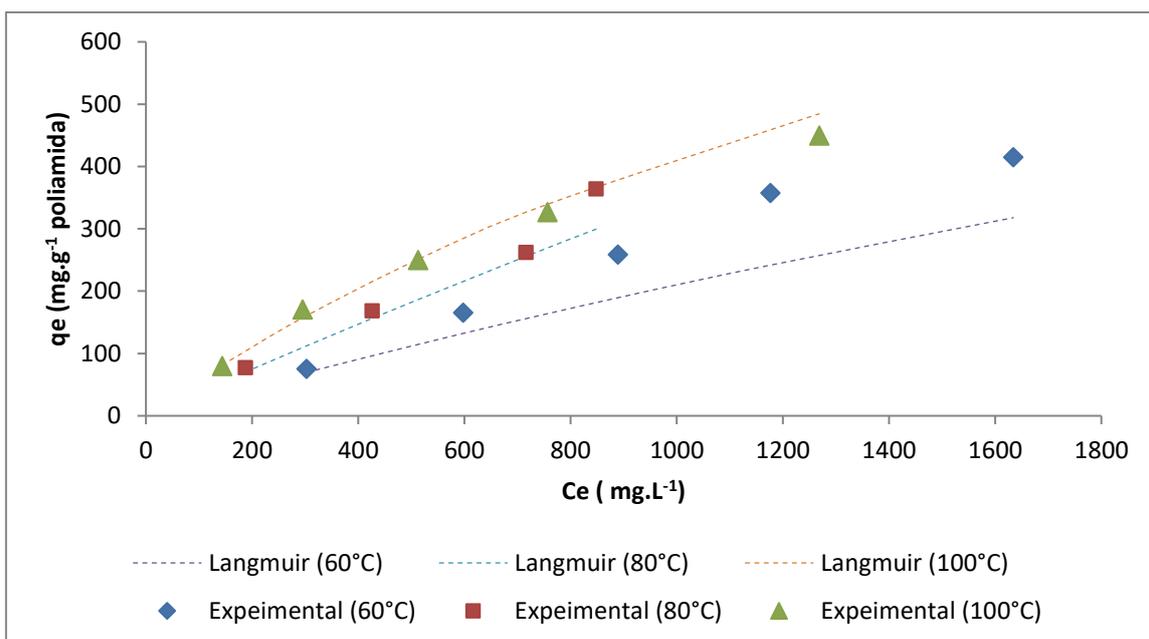


(b)

Figura 25 – Isotermas de adsorção não linear do modelo de Freundlich (a) e Lagmuir (b) para a fibra de poliamida



(a)



(b)

Segundo Andia (2009), a curvatura da isoterma para a fibra de algodão com um início levemente vertical demonstra uma adsorção inicial elevada alcançando o equilíbrio em seguida, mostrando certa afinidade do adsorbato para o adsorvente. Na curva isotérmica da poliamida, observa-se uma curva de aspecto linear, indicando que o número de sítios ativos é constante e há uma partição constante do soluto entre a solução e o adsorvente. Segundo o mesmo autor, as

condições que favorecem este modelo de curva são a presença de moléculas flexíveis apresentando regiões de diferentes graus de cristalinidade, e a maior afinidade do soluto pelo adsorvente do que para com o solvente, decorrendo em uma penetração mais forte.

#### 4.5.3 Parâmetros termodinâmicos

Para a determinação dos parâmetros termodinâmicos, utilizou-se o procedimento descrito na Seção 3.2.8, utilizando os dados experimentais das isotermas de adsorção. As Figuras 26 e 27 apresentam os gráficos obtidos de  $q_e \cdot C_e^{-1}$  versus  $C_e$  para as temperaturas de 60, 80 e 100°C para o tingimento do algodão e poliamida com o extrato da cúrcuma. Por meio dos coeficientes lineares obtiveram-se os valores de  $K_c$  como apresentado na Tabela 10 e 11.

Figura 26 – Determinação da constante de equilíbrio termodinâmica do algodão nas temperaturas de 60 °C (a), 80 °C (b) e 100 °C (c)

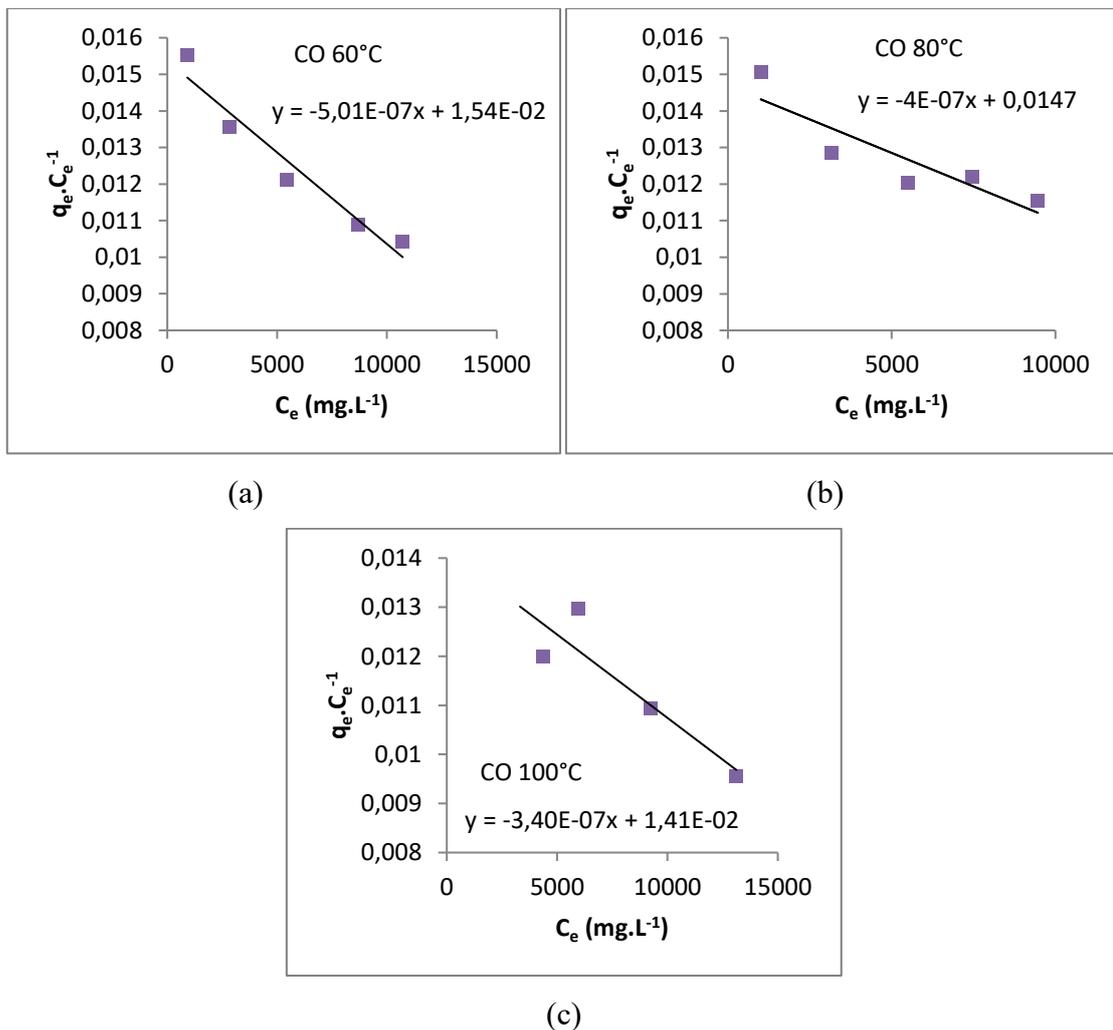
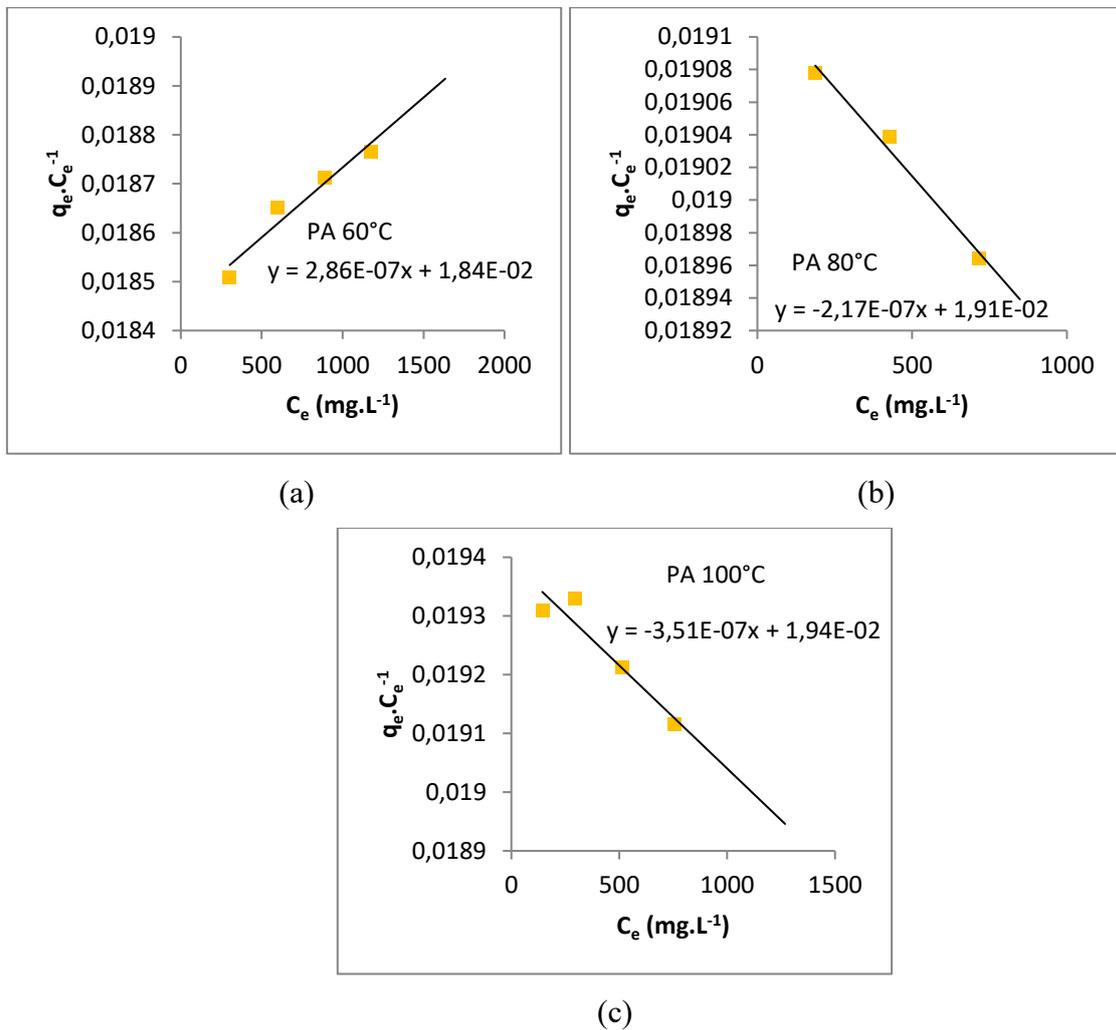
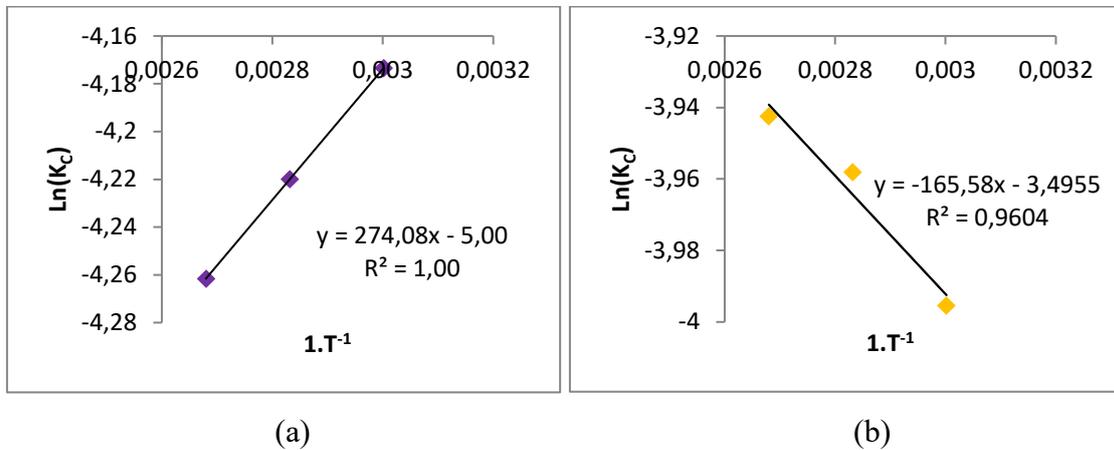


Figura 27 – Determinação da constante de equilíbrio termodinâmica da poliamida nas temperaturas de 60°C (a), 80°C (b) e 100°C (c)



A partir da equação de Van't Hoff (Equação 13), um ajuste linear de  $\ln K_C$  versus  $1.T^{-1}$  foi realizado como apresenta a Figura 28. Observa-se tanto para o algodão quanto para a poliamida que a função linear apresentou alto coeficiente de correlação ( $R^2$ ), 1,00 e 0,96 respectivamente.

Figura 28 – Valores de  $\ln K_C$  versus  $1.T^{-1}$  para determinação dos parâmetros termodinâmicos do algodão (a) e poliamida (b)



Os resultados dos parâmetros termodinâmicos para a adsorção do extrato da cúrcuma no algodão e poliamida são apresentados na Tabela 10 e 11.

Tabela 10 – Parâmetros termodinâmicos para a adsorção do extrato da cúrcuma no algodão

Temperatura (°C)	$K_C$	$\Delta G^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta H^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
60	0,0154	16116,00		
80	0,0147	16946,73	2278,03	-41,53
100	0,0141	17777,47		

Tabela 11 – Parâmetros termodinâmicos para a adsorção do extrato da cúrcuma na poliamida

Temperatura (°C)	$K_C$	$\Delta G^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta H^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
60	0,0184	8304,51		
80	0,0191	8885,66	-1375,97	-29,05
100	0,0194	9466,81		

Apesar dos valores de  $K_C$  serem próximos entre si para ambas as fibras, é possível observar que para o algodão, o maior valor de  $K_C$  foi obtido para a temperatura de 60°C, indicando que nesta temperatura, dentre a faixa investigada, obteve-se um melhor resultado de adsorção. O oposto ocorreu com a poliamida, onde o maior valor de  $K_C$  foi obtido para a temperatura de 100°C, o que de certa forma, era esperado para a fibra sintética.

Os parâmetros termodinâmicos  $\Delta H^\circ$  e  $\Delta S^\circ$  foram obtidos por meio do coeficiente angular e linear pelo ajuste linear (Figura 28).

Segundo Sadeghi-kiakhani *et al.* (2018), a variação de entalpia ( $\Delta H^\circ$ ) no sistema de tingimento indica a quantidade de energia liberada das interações entre as cadeias de fibras e

moléculas de corante. Em outras palavras,  $\Delta H^\circ$  indica a quantidade de energia térmica liberada devido à adsorção de moléculas de corante em cadeias poliméricas de fibra. O mesmo autor afirma que geralmente a adsorção de corantes em têxteis é um processo exotérmico, processo que libera energia térmica. Entretanto, a quantidade de calor liberado durante o tingimento é influenciado pelo tipo de fibra, corante e o meio de tingimento.

Para o tingimento do algodão, o valor calculado de entalpia ( $\Delta H^\circ$ ) é positivo, indicando que a adsorção é endotérmica, ou seja, calor é absorvido durante o processo de adsorção. Segundo Youssef *et al.* (2004), quando o processo de adsorção é endotérmico a quantidade de corante adsorvida no equilíbrio tende a aumentar de acordo com o aumento da temperatura. Resultados de entalpia positiva para o tingimento do algodão com curcumina também foi encontrado no trabalho de Haque *et al.* (2018), assim como para Hossain *et al.* (2021) ao tingir algodão com corante natural extraído da casca de cacau.

Diferente para o tingimento da poliamida, o valor de entalpia foi negativo, indicando que o processo de tingimento é exotérmico, ou seja, o calor é liberado durante o processo de adsorção. Segundo Silva (2013), em processos exotérmicos, menos corante é adsorvido no equilíbrio com o aumento da temperatura. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Sadeghi-kiakhani *et al.* (2018) ao tingirem a poliamida com o corante natural de cochonilha, e Gulrajani *et al.* (2002) ao tingirem a lã com o extrato alcoólico de corante natural de sândalo vermelho.

Sadeghi-kiakhani *et al.* (2018) afirma que a adsorção do corante ocorre mais frequentemente em locais amorfos de fibra. Devido aos corantes adsorvidos que se tornam mais contidos dentro das moléculas de polímero do que no tingimento solução, a variação de entropia ( $\Delta S^\circ$ ) na maioria dos processos de tingimento tem valor negativo, como observado nos valores experimentais obtidos para o algodão e poliamida. O valor de  $\Delta S^\circ$  pode ser expresso como a proporção de corantes ligados aos polímeros, sendo possível observar um valor maior para a poliamida quando comparada com o algodão, demonstrando uma ligação mais forte da poliamida com a curcumina.

A energia livre de Gibbs avalia a afinidade entre o adsorvato e adsorvente, podendo indicar se o processo é espontâneo ou não, relacionando ao trabalho necessário para tornar os sítios disponíveis. Para ambas as fibras, os valores de energia livre de Gibbs para a adsorção do corante da cúrcuma foram positivos e aumentaram com o aumento da temperatura, indicando a não espontaneidade do processo (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Entretanto, pode-se dizer se o processo será espontâneo ou não olhando o sinal algébrico de  $\Delta H^\circ$  e  $\Delta S^\circ$  na equação  $\Delta G =$

$\Delta H - T\Delta S$ , pois se olharmos detalhadamente nesta equação, observa-se que a energia livre de Gibbs depende de três fatores: a variação na entalpia, a variação na entropia, e a temperatura. Como a temperatura é sempre positiva, porque têm unidades em escala Kelvin, o segundo termo da equação  $T\Delta S$  terá sempre o mesmo sinal que  $\Delta S$ .

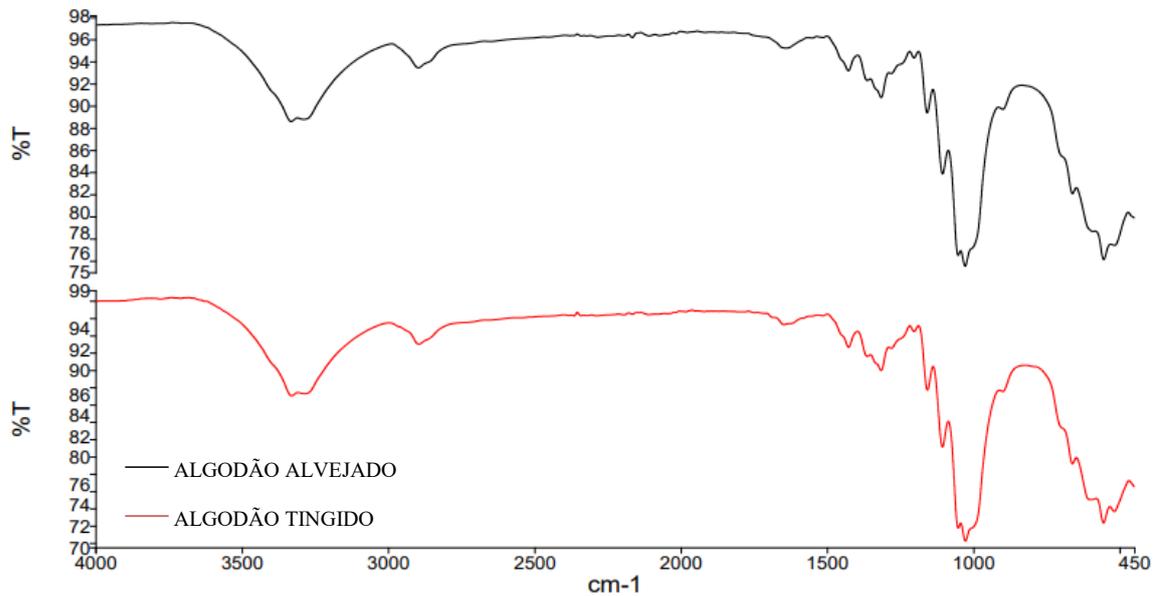
Para o algodão, o processo é endotérmico ( $\Delta H > 0$ ), e a entropia é negativa ( $\Delta S < 0$ ), decorrendo em um  $\Delta G$  positivo, ou seja, o processo não é espontâneo. Reações exotérmicas ( $\Delta H < 0$ ), que diminuem a entropia do sistema ( $\Delta S < 0$ ) são consideradas espontâneas, como mostra os dados experimentais da poliamida. Nota-se, ainda, que com o aumento da temperatura foram obtidos maiores valores para  $\Delta G^\circ$ , implicando uma menor força motriz para o processo de adsorção em temperaturas mais elevadas. Valores positivos para a energia livre de Gibbs também foram observados para o algodão no trabalho de Haque *et al.* (2018), e para a poliamida no trabalho de Sadeghi-kiakhani *et al.* (2018).

Segundo Sadeghi-kiakhani *et al.* (2018) e Silva (2013), as variáveis operacionais no processo de tingimento, como pH, temperatura, solubilidade e propriedades do corante, o uso de aditivos auxiliares, bem como as próprias características físicas e químicas do adsorvente afetam diretamente o mecanismo de retenção e difusão do corante na fibra.

#### 4.6 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO POR ESPECTROFOTOMETRIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A análise de FTIR realizada com as amostras alvejadas e tingidas do algodão e da poliamida, não apresentou diferença de expressiva intensidade. Tendo em vista, que a análise FTIR detecta os grupos funcionais orgânicos sobre o substrato, não foi possível detectar alteração de comportamento da amostra de algodão após o tingimento com o extrato da cúrcuma. O resultado da análise de FTIR do algodão obtido, apresentado na Figura 29, exhibe os grupos funcionais típicos deste material.

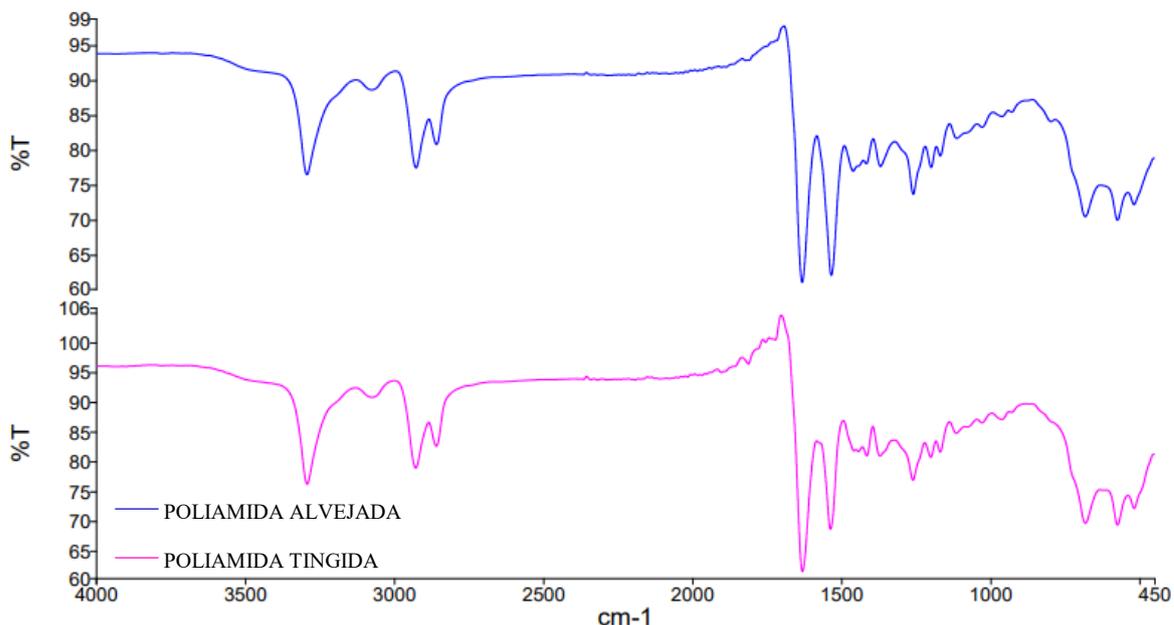
Figura 29 – Resultado da análise FTIR nas amostras de algodão alvejado e tingido



De acordo com Mendes (2020), a banda de absorção em  $3334\text{ cm}^{-1}$  é relacionada à vibração de alongamento atribuída dos grupos hidroxilas (-OH), os quais formam ligações de hidrogênio da molécula da celulose. O pico em  $2896\text{ cm}^{-1}$  é característico da vibração da ligação C-H da celulose e hemicelulose. Entre  $1316\text{ cm}^{-1}$  e  $1362\text{ cm}^{-1}$  os grupos presentes são C-H e C-O e em  $1428\text{ cm}^{-1}$  a grupos  $\text{CH}_2$ . O pico intenso entre  $1100\text{ cm}^{-1}$  e  $1000\text{ cm}^{-1}$  está relacionado com vibrações dos grupos C-O e OH, do polissacarídeo na celulose (SILVERSTEIN; WEBSTER; KIEMLE, 2013; PORTELLA *et al.*, 2016; HARBS *et al.*, 2019).

A Figura 30 mostra o espectro da poliamida com as bandas características da fibra de poliamida, como o grupo amida em  $3296\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde a ligação N-H devido à vibrações de alongamento, e na região de  $1632\text{ cm}^{-1}$ , banda da amida I, vibrações de alongamento da ligação amida carbonilo (C=O) (PARVINZADEH, ASSEFIPOUR; KIUMARSI, 2009; KANELLI *et al.*, 2017; MENDES, 2020). As bandas da região  $2930\text{ cm}^{-1}$  e  $2862\text{ cm}^{-1}$  estão associadas às vibrações de alongamento assimétrico e simétrico do grupo  $\text{CH}_2$ , respectivamente (MARKOVIC *et al.*, 2018). A banda amida II, que aparece em  $1534\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao movimento de flexão de N-H e alongamento do C-N (SADEGHI-KIAKHANI; SAFAPOUR, 2016).

Figura 30 – Resultado da Análise FTIR nas amostras de poliamida alvejada e tingida



Na amostra de poliamida tingida encontram-se picos de baixa intensidade diferentes da poliamida purgada no comprimento de onda de 800, 1458, 1534 e 1574  $\text{cm}^{-1}$ , comprimento de onda estes compatíveis com os da curcumina.

O Apêndice B apresenta o espectro da curcumina com as bandas características do material como a presença de grupos OH na faixa de 3508  $\text{cm}^{-1}$ , além de pico em 1596  $\text{cm}^{-1}$  atribuído ao alongamento do anel aromático simétrico C=C presente na estrutura da curcumina, estiramento da ligação C=O em 1500  $\text{cm}^{-1}$  e pico de enol C-O em 1270  $\text{cm}^{-1}$  (SINGH *et al.*, 2014; CHEIN *et al.*, 2015; GONZALEZ-ALBADALEJO *et al.*, 2015).

Na amostra de poliamida tingida puderam-se observar alterações de baixa intensidade em 1574  $\text{cm}^{-1}$  que estão associadas às vibrações de estiramento simétricas do anel aromático da curcumina e em 1458  $\text{cm}^{-1}$ , referindo-se às vibrações C=C do anel aromático e alongação da ligação C-O presentes na curcumina.

Observou-se também um deslocamento leve de pico de 1534  $\text{cm}^{-1}$  para 1538  $\text{cm}^{-1}$  associadas às vibrações mistas incluindo vibrações de estiramento de ligações carbonila da curcumina, sugerindo uma possível interação entre os grupamentos OH da curcumina com a carbonila da amida em substituição acíclica. E uma leve alteração na banda de 800  $\text{cm}^{-1}$ , que segundo González-Albadalejo *et al.* (2015), bandas entre 800 e 850  $\text{cm}^{-1}$  representam grupo aromático trissubstituído da curcumina. Estas alterações entre as amostras alvejadas e tingidas sugerem a existência de interações químicas entre a curcumina e a poliamida. Outro indicativo de reação foi observado nos testes de solidez úmidos (Seção 4.8), com perda de cor inferior

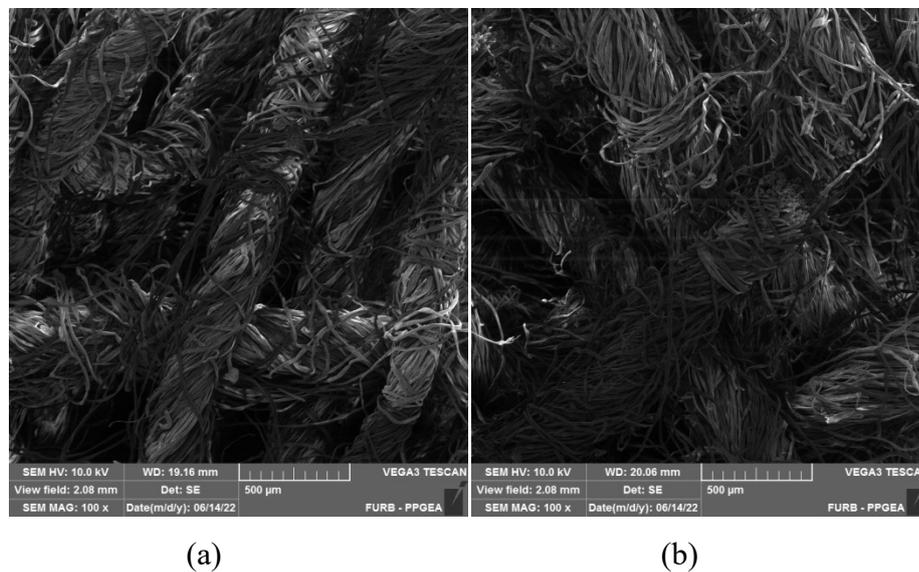
quando comparado com o algodão, mostrando a construção de ligações químicas que não podem ser quebradas facilmente. O Apêndice C apresenta as bandas mencionadas com identificação dos pontos de pico de transmitância.

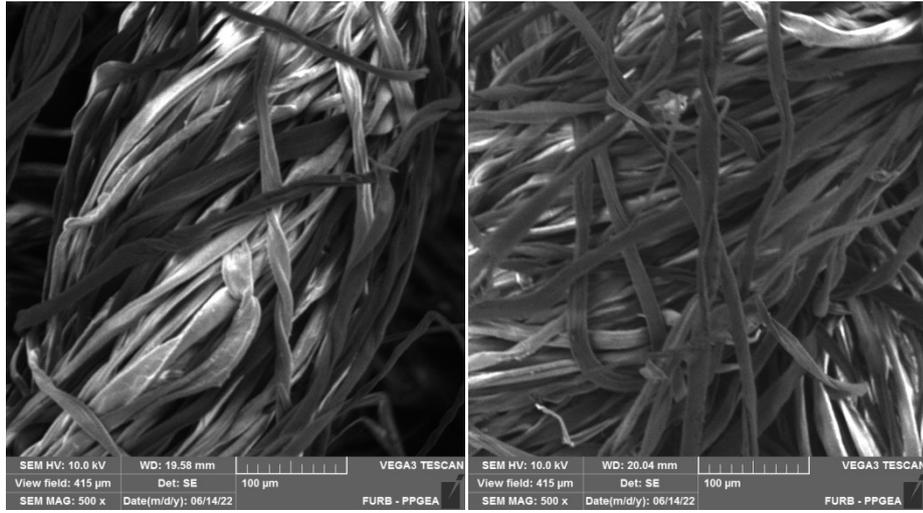
#### 4.7 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é utilizada como uma ferramenta que permite correlacionar as propriedades físico-químicas com a estrutura morfológica, sendo possível visualizar na superfície do material, imperfeições, presença de corante e/ou impurezas.

As micrografias da superfície das amostras de algodão e poliamida alvejadadas e tingidas analisadas em microscopia estão apresentadas na Figura 31 e 32.

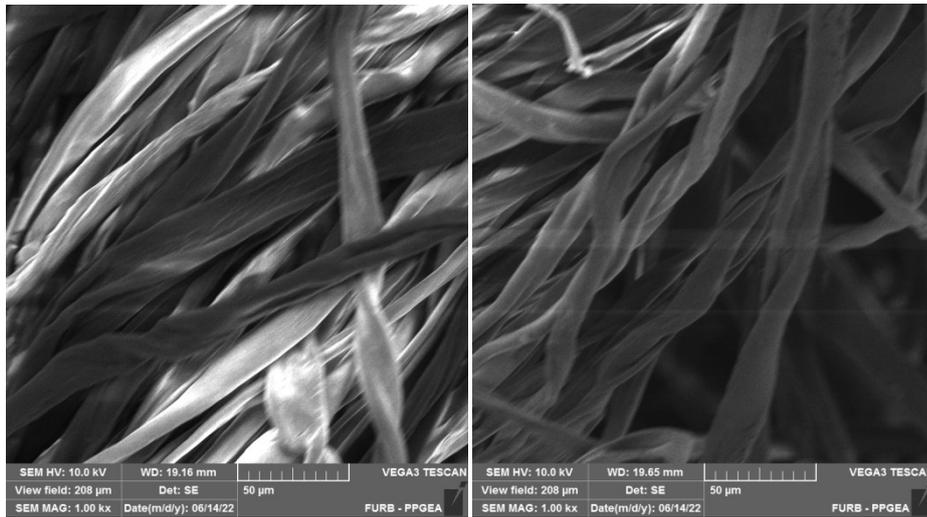
Figura 31 – Micrografias da amostra de algodão alvejada (a, c, e), amostra de algodão tingida com o extrato da cúrcuma (b, d, f) em ampliação de 100x (a – b), ampliação de 500x (c – d), ampliação de 1000x (e – f)





(c)

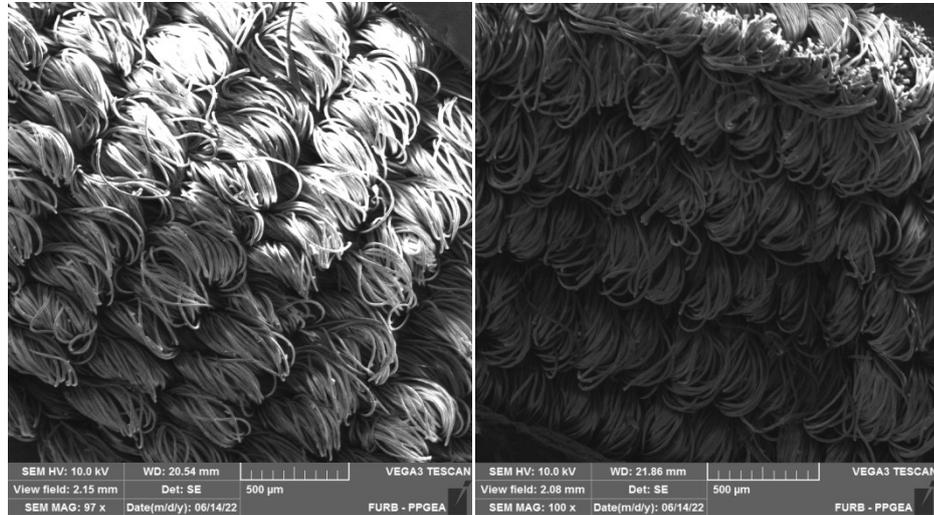
(d)



(e)

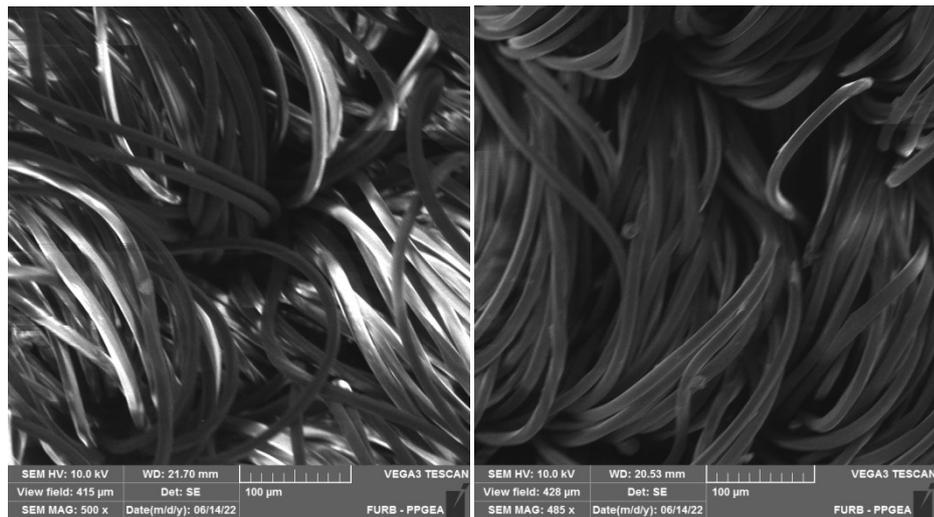
(f)

Figura 32 – Micrografias da amostra de poliamida alvejada (a, c, e), amostra de poliamida tingida com o extrato da cúrcuma (b, d, f) em ampliação de 100x (a – b), ampliação de 500x (c – d), ampliação de 1000x (e – f)



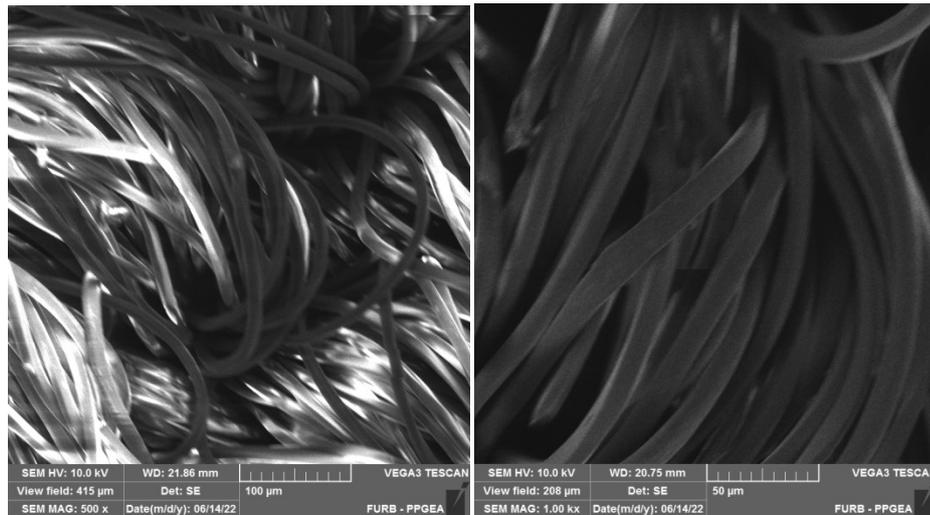
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

A análise em microscopia eletrônica mostrou detalhadamente a superfície do tecido de algodão e malha de poliamida. Contudo, as imagens geradas não apresentaram a presença de corante cristalizado e/ou aglomeração de curcumina na superfície das fibras, devido principalmente ao tamanho destes compostos, limitações e instabilidade da análise em relação ao aumento de amplitude das imagens. Quando comparadas entre si, as amostras alvejadas e tingidas apresentam as mesmas características morfológicas, com torções e convoluções características do algodão, e superfície lisa para a poliamida, indicando adsorção homogênea da solução de tingimento com extrato de corante da cúrcuma nas fibras.

#### 4.8 TESTES DE SOLIDEZ

A seguir serão apresentados os testes de solidez à lavagem, fricção, água e luz seguindo as normas da ABNT. Vale ressaltar que as notas de solidez aos tratamentos úmidos variam de 5 a 1, sendo 5 nenhuma alteração de nuance e 1 para grande alteração.

##### 4.8.1 Solidez à lavagem

Para os testes de solidez à lavagem obedeceu-se aos procedimentos da norma NBR ISO 105-C06 Ciclo A1S - Solidez de cor à lavagem doméstica e comercial, com o intuito de verificar a fixação do corante na fibra. Na Tabela 12, são apresentadas as notas de solidez da cor a

lavagem quanto à alteração da cor no tecido de algodão e poliamida e transferência de cor para o tecido-testemunha de algodão e poliamida.

Ao efetuar o teste de solidez à lavagem utilizando o detergente neutro, foi observada uma mudança na tonalidade nos tecidos após os testes, tornando-se intensamente avermelhados como apresenta a Figura 33. Este fato ocorre devido à alcalinidade da solução de detergente, que apresentou pH de 10,6, causando uma mudança na estrutura do corante conhecido como efeito batocrômico, comportamento semelhante encontrado por Reddy *et al.* (2013) ao realizar os testes de solidez a lavagem em algodão tingido com curcumina. Segundo Hasan *et al.* (2014) e Patil *et al.* (2018) em solução alcalina, a curcumina reage com o álcali, e a mesma é altamente instável à degradação química, efeitos atribuídos à mudanças na estrutura molecular de curcumina. Desta forma, é de se esperar a mesma mudança de tonalidade na lavagem doméstica, caso seja empregado um detergente de natureza alcalina.

Tabela 12 – Solidez da cor à lavagem dos tecidos de algodão e poliamida tingidos com o corante extraído da cúrcuma

<b>Amostra</b>	<b>Alteração de cor</b>	<b>Transferência no algodão</b>	<b>Transferência na poliamida</b>
Algodão	1	2	-
Poliamida	2-3	2	2-3

A amostra de algodão apresentou grau de alteração de cor igual a 1, que corresponde a uma situação de grande alteração. Já a poliamida apresentou grau de alteração superior ao algodão com nota de 2-3. A alteração de cor para ambas as amostras foram influenciadas pelo detergente alcalino, que dificultou a determinação do grau de solidez correto para as amostras de tecido.

Figura 33 – Amostras de algodão e poliamida antes e depois do ensaio de solidez à lavagem demonstrando elevado grau de alteração de cor.



Em relação a transferência de cor para as amostras de tecido-testemunha, elevada coloração foi observada nas amostras, refletindo em notas inferiores no que diz respeito as notas aceitáveis sob o ponto de vista comercial (4 a 5) tanto para o algodão quanto para a poliamida. Verificou-se ainda que as diferenças da estrutura física e química das fibras influenciaram de certa forma nos resultados de alteração de cor, sendo esta diferença também observada nos ensaios de tingimento e descoloração.

Resultados de solidez a lavagem com notas variando de (2,8 a 5) de amostras tingidas com curcumina foram abordados por Reddy *et al.* (2013) atribuindo à estabilidade da estrutura da curcumina. Elnagar *et al.*(2014), por exemplo, obtiveram nota de transferência de cor 3 e alteração de cor 4 para poliamida tingidos com curcumina. Segundo Azarmi e Ashjaraan (2017), os corantes naturais possuem baixa solidez, e em testes de solidez à lavagem, os resultados podem ser melhorados com a utilização de mordentes.

#### 4.8.2 Solidez à fricção

Os resultados de solidez da cor à fricção a seco e a úmido (65%) para o tecido-testemunha de 100% algodão alvejado estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Solidez da cor à fricção dos tecidos de algodão e poliamida tingidos com o corante extraído da cúrcuma

<b>Amostra</b>	<b>Seco</b>	<b>Úmido</b>
Algodão	4-5	2-3
Poliamida	4-5	4-5

Diferentemente dos resultados de solidez à lavagem, os resultados de solidez a fricção apresentaram notas superiores, permanecendo no intervalo de 4 a 5 para o teste a seco. No caso da fricção a úmido, observa-se que o algodão apresentou índice inferior a poliamida, indicando baixa afinidade do corante com a fibra, fazendo com que o corante seja retirado do substrato quando friccionado com tecido testemunha úmido. O tecido quando friccionado a seco não transfere tanto corante, porém a presença da água é responsável por facilitar a remoção do corante da superfície do tecido tingido. Resultado semelhante ao encontrado por El-Shishtawy *et al.*(2009) que obtiveram em sua pesquisa valores de solidez a fricção seco 3-4 e úmido 3 com as amostras de acrílico modificado tingido com curcumina.

### 4.8.3 Solidez à água

Os ensaios de solidez à água seguiram a norma NBR ISO 105-E01 – Ensaio de solidez da cor à água os resultados obtidos para a alteração de cor e transferência da cor para as amostras de tecido-testemunha estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Solidez da cor à fricção dos tecidos de algodão e poliamida tingidos com o corante extraído da cúrcuma

Amostra	Alteração de cor	Transferência no algodão	Transferência na poliamida
Algodão	4-5	1	-
Poliamida	4-5	4	3-4

Os resultados de solidez à água em relação à alteração de cor foram bons para ambas as fibras, com índices de 4-5. Entretanto, as notas de solidez à transferência da cor não foram tão boas, principalmente para o algodão, apresentando nota 1. Assim como nos testes de solidez à fricção, os resultados para o algodão foram inferiores aos da poliamida, mostrando novamente a baixa afinidade do corante com a fibra de algodão, resultando na migração do corante para a água, manchando o tecido testemunha e perdendo cor.

### 4.8.4 Solidez à luz

A nota de alteração de cor com a luz de xenônio foi 1 (muito alterado) para ambas as fibras. Conforme Reddy *et al.* (2013), a curcumina possui como característica, pouca resistência a luz. Os mesmos autores em seus experimentos em tecidos de algodão tingidos com curcumina observaram o desaparecimento da cor após testes de solidez à luz com luz xenônio. Mesmo resultado encontrado por Han e Yang (2005) ao realizar o teste de solidez a luz com amostras de lã tingidas com curcumina.

Como observado, a curcumina é um produto sensível em meios com exposição à luz. Neste sentido, se futuramente aplicado como produto comercial, sugere-se a proteção deste material com embalagens de coloração, criando uma barreira física contra a luz.

#### 4.9 ENSAIO DE LIBERAÇÃO DA CURCUMINA EM ETANOL

As amostras de tecido de algodão e poliamida tingidos com extrato da cúrcuma (200% s.p.m.) foram submetidas aos ensaios de liberação em etanol conforme descrito na Seção 3.2.12. A fim de avaliar o comportamento das diferentes fibras sobre o mecanismo de difusão da curcumina, foi realizado o ensaio de liberação utilizando quatro diferentes proporções de volume de etanol 96° (25, 50, 75 e 100%) em solução aquosa.

Ensaio preliminares de dessorção realizados com água destilada e fluido corpóreo simulado nas mesmas condições citadas acima não apresentaram liberação do material corante das fibras tingidas, mostrando novamente a dificuldade da solubilidade do extrato em meio aquoso, esta mesma dificuldade foi encontrada nos ensaios de extração do corante (Seção 4.3).

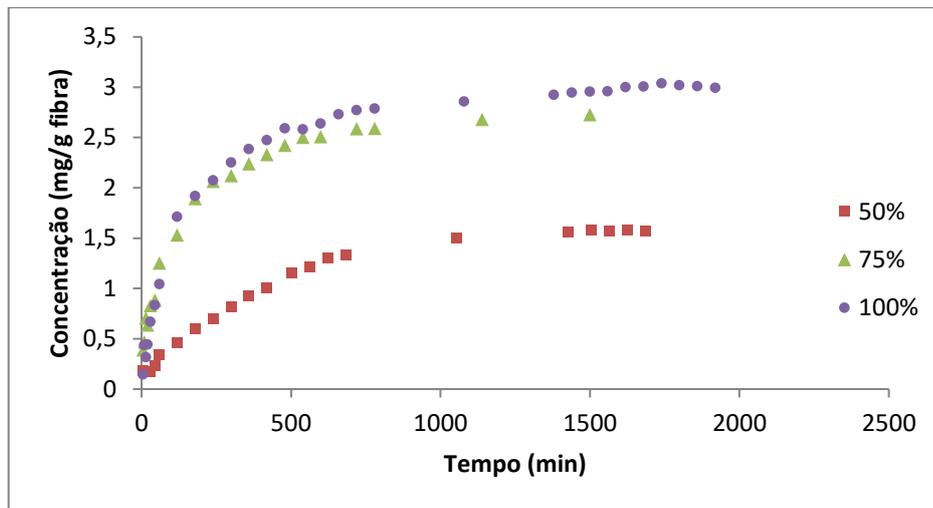
Em relação aos ensaios de liberação da curcumina em etanol a partir da amostra de algodão tingida, observou-se uma dessorção desordenada e não sustentada, não sendo possível a adequação a nenhum modelo matemático. Além disso, a quantidade máxima de curcumina liberada observada nos ensaios foi de 1,69 mg.g<sup>-1</sup>. Este valor representa menos de 1% da quantidade de curcumina adsorvida no processo de tingimento. Outro fato observado refere-se ao tempo relacionado ao equilíbrio de liberação, que apesar de bastante variável não ultrapassou 3 horas. Estes fatos sugerem a possibilidade de uma adsorção em multicamadas como observado no estudo de adsorção, e/ou um depósito de corante residual na superfície.

Em teoria, a carbonila da curcumina pode reagir com os grupos OH da celulose presentes no algodão por um mecanismo de adição, o que favoreceria a dessorção por se tratar de ligações fracas. Entretanto, observou-se que condições mais agressivas com influência de fatores físicos externos como os ensaios de solidez, influenciam fortemente de forma a facilitar a liberação do corante.

Em relação aos ensaios de liberação da curcumina a partir da amostra de poliamida tingida, observou-se o comportamento de uma liberação sustentada para as concentrações de 50, 75 e 100% de etanol. Com a concentração de 25% de etanol não foi possível quantificar o processo de liberação em leituras de espectrofotômetro.

A concentração de curcumina presente na poliamida e liberada para o meio foi determinado ao longo do tempo, e estes valores são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Cinética de liberação da curcumina da fibra de poliamida em 50, 75 e 100% de proporção de etanol



O estudo do perfil de liberação de um ativo é importante para entender o comportamento e o mecanismo pela qual a liberação ocorre. Portanto, para compreender e avaliar a liberação dos curcumina a partir da fibra de poliamida foram adotados os modelos matemáticos Lei da Potência, a solução em série da 2ª Lei de Fick e Higuchi para o ajuste do sistema de liberação.

No que tange as amostras de poliamida tingidas com extrato de cúrcuma em diferentes proporções de volume de etanol, os resultados mostraram perfis de liberação similares, os quais ocorreram em duas etapas: uma rápida liberação inicial seguida de um aumento mais lento até ao equilíbrio. A primeira etapa pode ser justificada pela liberação da curcumina que se encontrava na área mais superficial do substrato têxtil, ou seja, a parte do composto ativo que não foi difundida para o interior da fibra durante o tingimento.

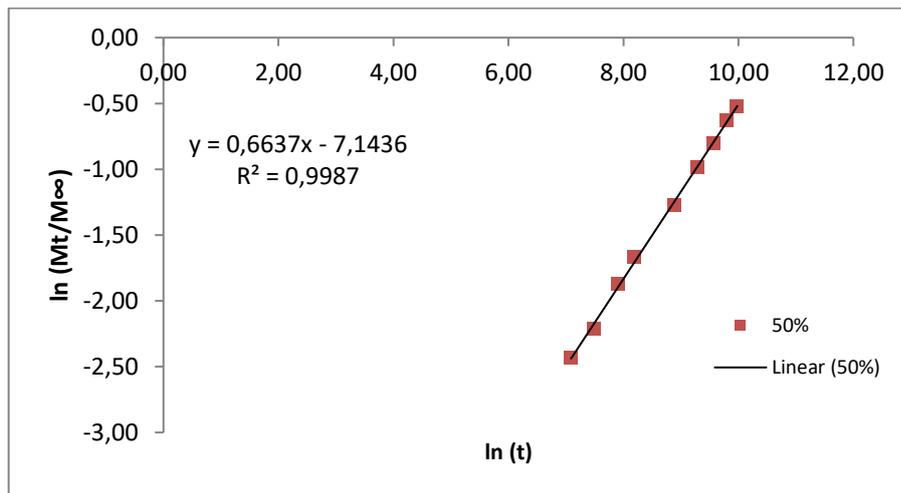
Como observado nos experimentos, em todas as proporções de volume de etanol, a liberação da curcumina mostrou início de estabilização após 12 horas de liberação, sendo observada nenhuma liberação após 24 horas submersa. Outro dado observado refere-se à influência da proporção de etanol na liberação, indicando que com a elevação de concentração de etanol, maior quantidade de curcumina foi liberada, sendo  $1,56 \text{ mg.g}^{-1}$  para 50%,  $2,58 \text{ mg.g}^{-1}$  para 75% e  $2,79 \text{ mg.g}^{-1}$  para 100%. Mostrando assim, que com o aumento da concentração do etanol, a dessorção da curcumina é facilitada pela afinidade deste composto com o meio. Este fato também pode ser observado nos valores de difusividade apresentados na Tabela 15.

Hang e He (2014) ao estudarem a dessorção de corantes reativos hidrolisados de algodão em meio de etanol-água, também observaram que a tensão superficial de um sistema etanol-

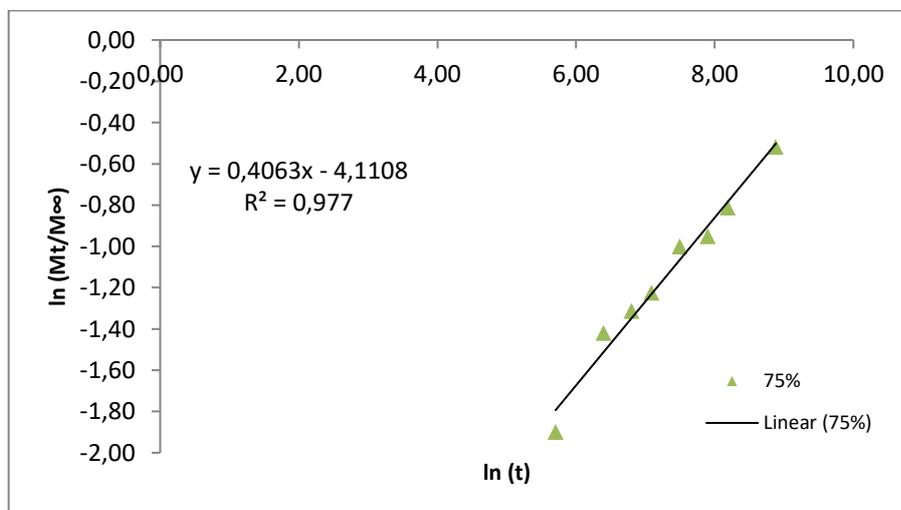
água é diferente daqueles em solução aquosa. E que o aumento da razão volumétrica de etanol para água causou uma diminuição da tensão superficial, sendo benéfico para a transferência de moléculas de corante do tecido de algodão para a solução etanol-água no sistema de dessorção.

O modelo da Lei da Potência (Equação 18) relaciona a perda de soluto no período de tempo inicial da liberação ( $Mt/M_\infty < 60\%$ ). Para todas as concentrações de etanol, foi plotado o gráfico  $\ln(Mt/M_\infty)$  versus  $\ln(t)$ . A Figura 35 apresenta a linearização para as três concentrações de etanol. Com a linearização, o expoente difusional  $n$  foi obtido a partir do coeficiente angular das retas enquanto a constante difusional  $k$  foi calculada a partir do coeficiente linear.

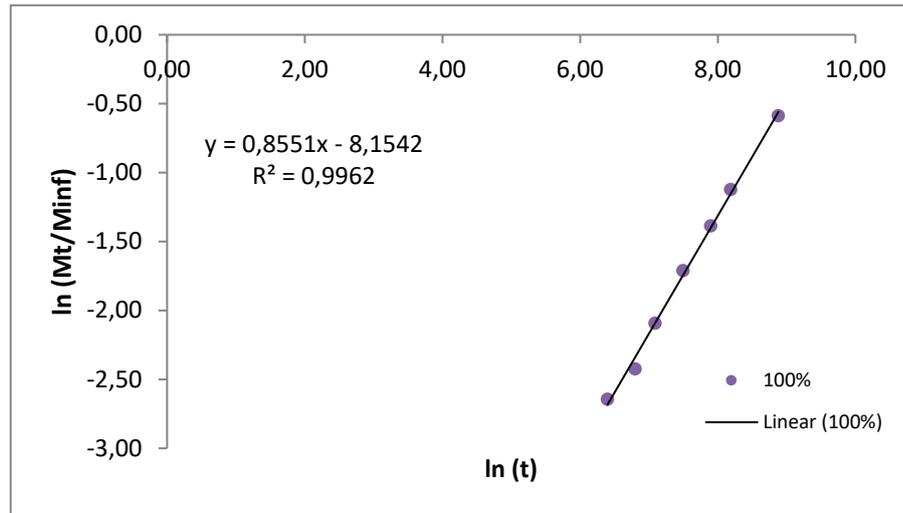
Figura 35 – Curva  $\ln(Mt/M_\infty)$  versus  $\ln(t)$  para a poliamida submersa em 50% (a), 75% (b) e 100% (c) de etanol



(a)



(b)



(c)

Os valores do expoente ( $n$ ) e constante difusional ( $k$ ) estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Expoente difusional ( $n$ ) e constante difusional ( $k$ ) da liberação de curcumina a partir da poliamida em proporção de 50, 75 e 100% de etanol

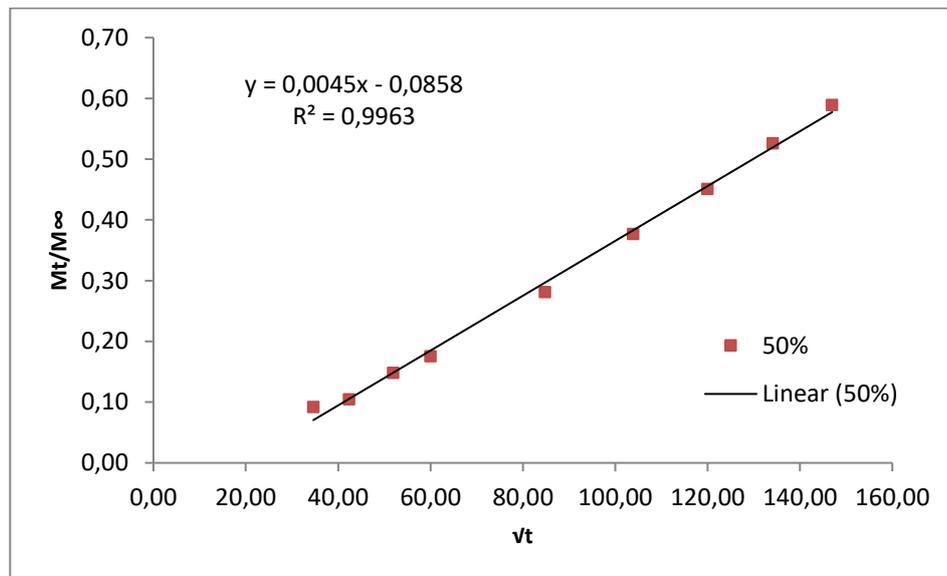
% Etanol	Lei da Potência (Equação 18)		
	$n$	$R^2$	$k$ ( $s^{-1}$ )
50	$0,66 \pm 0,01$	0,998	$7,90E-4 \pm 9,20E-05$
75	$0,40 \pm 0,01$	0,977	$1,64E-2 \pm 2,29E-03$
100	$0,85 \pm 0,07$	0,996	$2,88E-4 \pm 4,05E-04$

Os ajustes apresentaram coeficiente de correlação ( $R^2$ ) superiores a 0,977 indicando que o modelo da lei da potência representa consideravelmente bem os dados experimentais de forma a explicar o mecanismo de liberação. Os expoentes difusionais variaram de 0,40 a 0,85, sendo o menor valor obtido em 75% de etanol. Verifica-se que exceto para esta proporção de etanol, em que o coeficiente de correlação foi inferior, todas as demais apresentaram um expoente difusional entre 0,5 e 1 e coeficiente de correlação superior a 0,996. Os valores de expoente difusional entre 0,5 e 1 é característico da difusão anômala, mecanismo este em que a velocidade de difusão e a mobilidade da cadeia polimérica são da mesma ordem de magnitude e é dependente da cinética de intumescimento da matriz (MENDES, 2020). Segundo Trevisol *et al.* (2018) e Martí *et al.* (2021), no mecanismo anômalo há sobreposição de fenômenos de difusão e intumescimento.

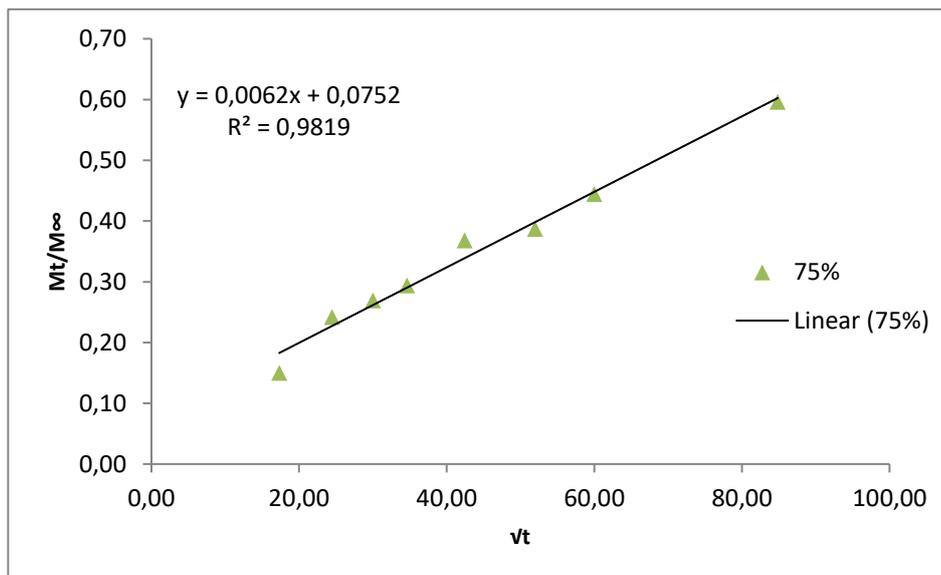
Em relação à constante  $k$ , quanto maior forem os valores, menor é o tempo para liberação do agente ativo. Entretanto, os resultados obtidos para a constante nas proporções de 50 e 100% de volume de etanol não apresentaram diferença expressiva. Mostrando que apesar da difusividade aumentar com a maior proporção volumétrica de etanol, o tempo de liberação é semelhante para estas concentrações.

Os dados obtidos durante os ensaios de liberação também foram ajustados ao modelo de Higuchi (Equação 18). Ao plotar  $M_t/M_\infty$  versus  $\sqrt{t}$ ,  $K$  é obtido a partir da inclinação da linha obtida como apresenta a Figura 36, e a difusão obtida pela Equação 19, resultados estes apresentados na Tabela 16.

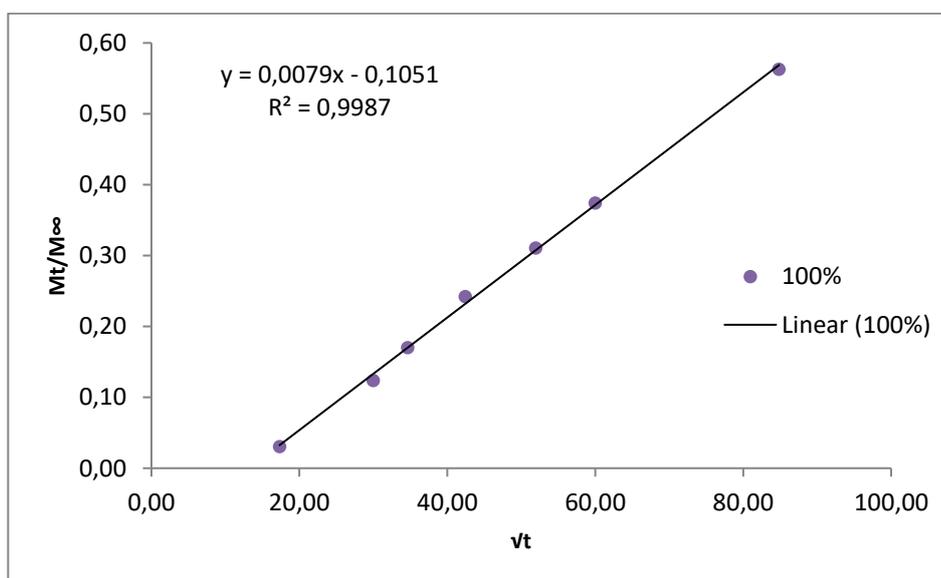
Figura 36– Curva  $M_t/M_\infty$  versus  $\sqrt{t}$  para a para a poliamida submersa em 50% (a), 75% (b) e 100% (c) de etanol



(a)



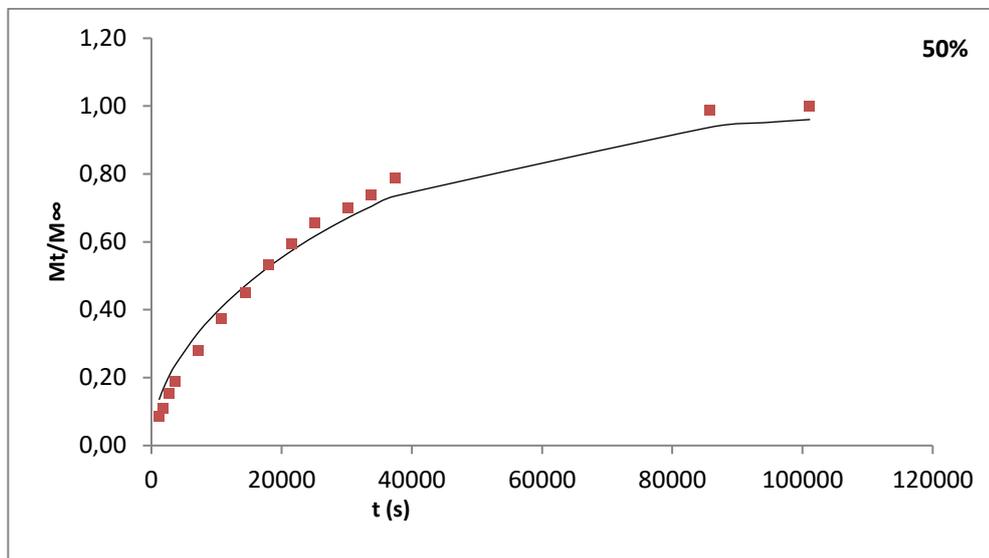
(b)



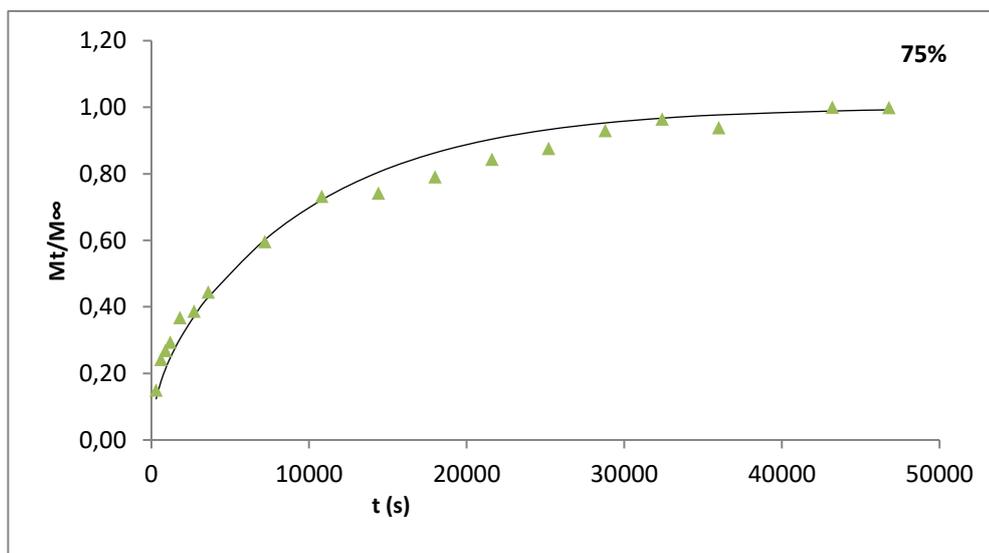
(c)

Os dados experimentais também foram ajustados ao modelo da Equação 17 para todo o processo de liberação e as curvas para a poliamida tingida com extrato de cúrcuma estão apresentadas na Figura 37.

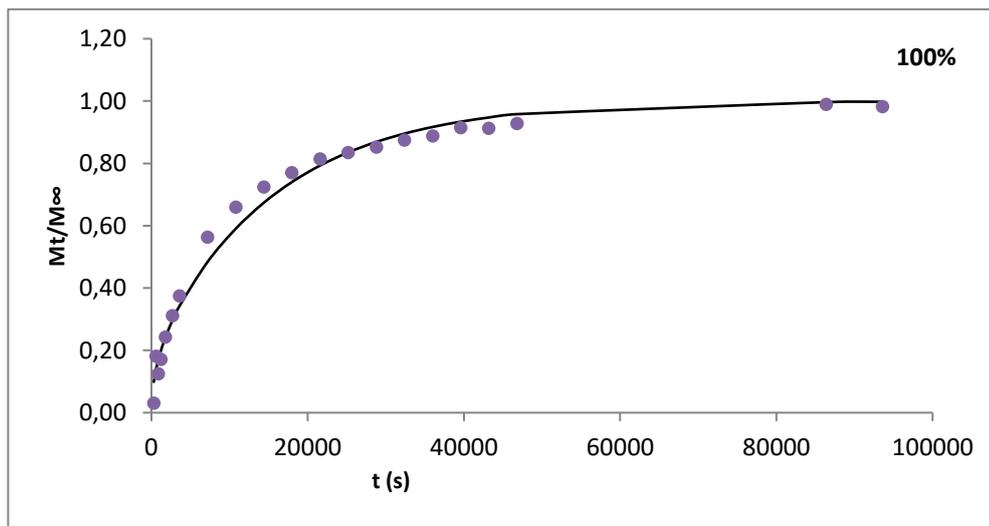
Figura 37 – Curva  $Mt/M_\infty$  versus  $t$  para a para a poliamida submersa em 50% (a), 75% (b) e 100% (c) de etanol. Valores experimentais (●) e modelo (—)



(a)



(b)



(c)

Na Tabela 16 estão dispostos os resultados obtidos para os cálculos da difusividade pela Equação 17 e Equação 19, bem como os respectivos coeficientes de correlação dos ajustes aos modelos.

Tabela 16 – Coeficiente de difusão ( $D$ ) e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para os ajustes dos modelos matemáticos aos dados experimentais da liberação de curcumina da poliamida tingida com extrato de cúrcuma em meio de diferente proporção de etanol

% Etanol	Modelo em Série (Equação 17)		Modelo Higuchi (Equação 19)	
	$D$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$R^2$	$D$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$R^2$
50	$1,45\text{E-}7 \pm 3,51\text{E-}09$	0,987	$3,05\text{E-}8 \pm 2,27\text{E-}09$	0,996
75	$4,80\text{E-}7 \pm 4,79\text{E-}08$	0,995	$5,79\text{E-}8 \pm 6,31\text{E-}08$	0,981
100	$3,08\text{E-}7 \pm 2,25\text{E-}08$	0,977	$9,41\text{E-}8 \pm 8,56\text{E-}09$	0,998

Os coeficientes de correlação mostram que os ajustes do modelo aos dados experimentais, de forma geral, foram bons. Observa-se que os valores de difusividade pelo método de Higuchi aumentaram com o aumento da proporção de volume de etanol, mostrando a influência do etanol na difusividade da curcumina. Observa-se também que a difusividade é superior quando analisado no modelo Higuchi, sugerindo a influência do intumescimento no processo difusivo.

Todos os modelos matemáticos aplicados se adequaram bem ao mecanismo de liberação da curcumina da poliamida, apresentando fatores de correlação superiores a 0,977. Entretanto,

o modelo de Higuchi apresentou fator de correlação superior a 0,98 para todas as proporções de volume de etanol, melhor descrevendo a dessorção da curcumina da poliamida. Sugerindo assim, uma dessorção regida pelo mecanismo principal de difusão (MENDES, 2019).

Resultado este semelhante ao de Uyen *et al.* (2020) em seus estudos de liberação a partir de microsferas de alginato carregadas de curcumina, observando um perfil de liberação melhor adequado com o modelo de zero-ordem e Higuchi, com fatores de correlação superiores a 0,90. Em seus estudos, observaram ainda uma liberação sustentada e lenta ao longo de 672 h, que segundo os autores decorre pela baixa solubilidade do fármaco em água, e constante  $n$  de 0,75 demonstrando um mecanismo de difusão anômalo (não Fickiano) que inclui tanto a liberação controlada por difusão quanto a liberação controlada por intumescimento.

Embora a liberação de curcumina a partir da poliamida tingida com extrato de cúrcuma tenha apresentado valor máximo de  $2,76 \text{ mg.g}^{-1}$ , ou seja, 0,88% da curcumina adsorvida no processo de tingimento, a liberação apresentou comportamento sustentado. Mostrando novamente, maior interação com a fibra de poliamida.

Xie *et al.* (2019), apesar de obterem um processo de liberação sustentado por até 400 h, também obtiveram baixa porcentagem de liberação de 0,3-0,5% em peso de membranas carregadas ao estudarem a liberação de curcumina e 5-fluorouracil encapsuladas de membrana nanofibrosa à base de fibroína de seda.

A liberação de um composto ativo é influenciada por diversos fatores, incluindo a composição do material, a razão entre os componentes, as interações físicas e/ou químicas e os métodos de preparação. Segundo Mendes (2020), devido à complexidade do sistema de liberação, nem sempre fica evidente qual dos sistemas esta dominando o mecanismo de liberação, podendo a substância ativa ser libertada por mais de um mecanismo de liberação em simultâneo, além da possibilidade de o mecanismo dominante mudar com o tempo.

Martí *et al.* (2021), por exemplo, ao avaliar o sistema de liberação do ácido gálico microencapsulado em poli-ε-caprolactona aplicado em algodão e poliamida liberado em meio de soro fisiológico, observaram que a afinidade dos têxteis e do ácido gálico influenciaram o mecanismo de liberação. Na mesma pesquisa, os pesquisadores obtiveram como resultado uma clara difusão Fickiana para o algodão e para poliamida, a difusão foi anômala.

Afim de que se consiga prolongar a durabilidade e aumentar o controle de liberação de determinadas substâncias há a necessidade de protegê-las (BEZERRA, 2016). Segundo Goëlo *et al.* (2020), devido à instabilidade química da curcumina, a incorporação do ativo em sistemas de entrega baseados em carreadores é ideal para melhorar sua estabilização e biodisponibilidade

em aplicações. Neste sentido, diversos estudos têm proposto a utilização de barreiras físicas ou químicas para liberação lenta e controlada de ativos, como a utilização de revestimentos, micro ou nanoencapsulação (COELHO *et al.*, 2010; TREVISOL *et al.*, 2018).

#### 4.10 ENSAIO ANTIMICROBIANO

Microrganismos como *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*, multiplicam-se rapidamente no substrato têxtil quando encontram um ambiente favorável de calor, umidade e nutrientes conveniente ao seu crescimento. Neste sentido, a Tabela 17 apresenta o percentual de aumento e redução das bactérias *E. coli* e *S. aureus*, e as Figuras 38 e 39 apresentam de forma visual os resultados obtidos para a atividade antimicrobiana das amostras de tecido tingidas com 200% s.p.m de extrato de cúrcuma. Os resultados apresentados nas figuras estão representados em termos de fator logarítmico da contagem do número de colônias no tempo zero e após 1 h e 24 h de contato da amostra com a suspensão de bactérias.

Figura 38 – Efeito antimicrobiano dos tecidos de algodão e poliamida alvejados e tingidos com extrato de cúrcuma contra *E. coli*

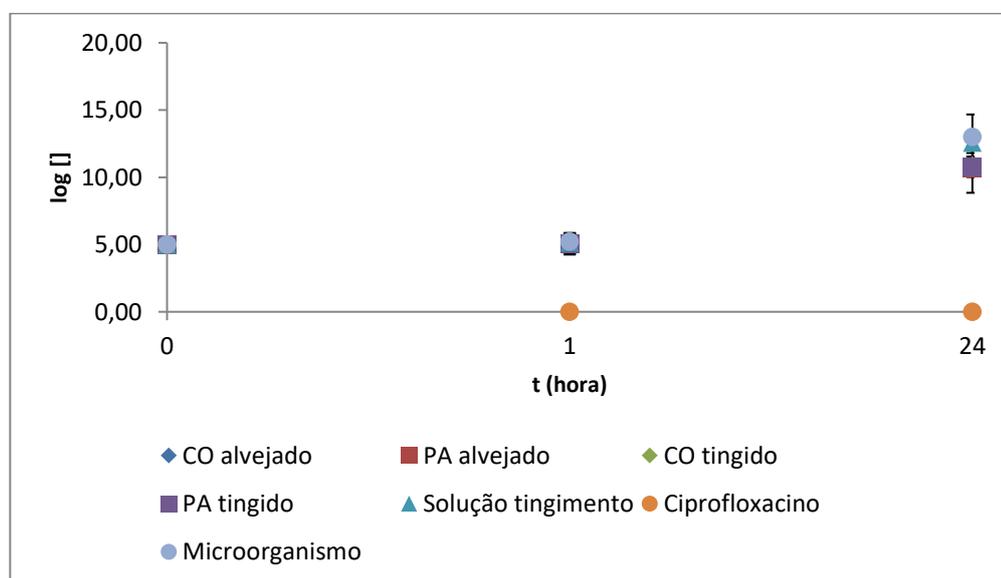


Figura 39 – Efeito antimicrobiano dos tecidos de algodão e poliamida alvejados e tingidos com extrato de cúrcuma contra *S. aureus*

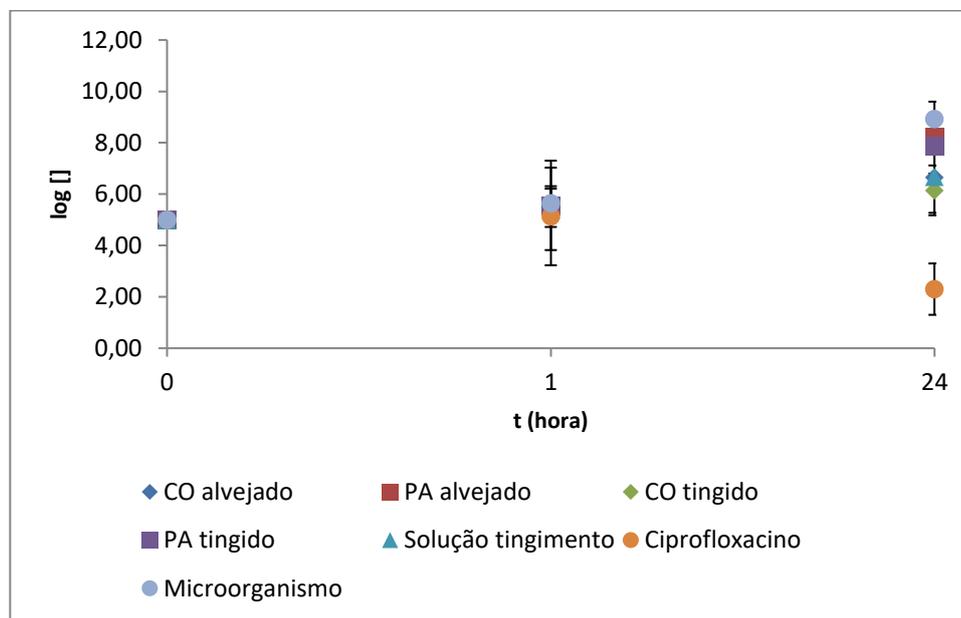


Tabela 17 – Percentual de aumento e redução das bactérias *E. coli* e *S. aureus* nos tecidos de algodão e poliamida alvejados e tingidos com extrato de cúrcuma

Amostra	Percentual de Aumento e Redução (%)			
	<i>E. coli</i>		<i>S. aureus</i>	
	1 h	24 h	1 h	24 h
CO alvejado	+1,79	+52,99	+8,53	+17,78
PA alvejado	+1,56	+52,69	+10,11	+31,17
CO tingido	+1,20	+53,56	+7,52	+12,03
PA tingido	+1,56	+52,90	+9,96	+29,40
Solução corante de tingimento	+3,40	+58,86	+7,59	+19,02
Ciprofloxacino	- 100,00	-100,00	+2,54	-100,00
Microorganismo	+4,29	+59,82	+11,32	+36,79

As amostras tingidas ao serem submetidas ao teste antimicrobiano não mostraram qualquer atividade contra os microrganismos testados, sendo observado o aumento de número de bactérias na primeira hora e em 24 h. Para além dos têxteis tingidos, foi também testado o controle negativo que correspondia a amostras de algodão e poliamida alvejados, no qual se observou crescimento de todos os microrganismos, como era esperado, e apenas a solução de tingimento com extrato de cúrcuma ( $1,77 \text{ mg mL}^{-1}$ ), o qual mostrou ser uma concentração

ineficiente para atividades inibitórias da curcumina no têxtil e/ou sofreu influência do manuseio ou metodologia de extração, decorrendo na não atividade das amostras tingidas. Essa não atividade antimicrobiana a partir de extratos etanólicos da cúrcuma (50 g de cúrcuma: 500 mL de etanol) também foi encontrada por Péret-Almeida e colaboradores (2008) ao analisar a atividade antimicrobiana de extratos etanólicos da cúrcuma em pó e da curcumina comercial para diversos microrganismos incluindo *Staphylococcus aureus* e *Escherichia coli*.

Ao comparar o comportamento das diferentes bactérias testadas, observou-se um maior crescimento da *E. coli* em todos os meios testados após 24 h. Esta inibição mais acentuada para *S. aureus* contra a curcumina foi observado por Han e Yang (2005) e também por Reddy *et al.* (2013), em que uma concentração de curcumina 10 vezes maior que a necessária para inibir a *S. aureus* foi preciso para obter uma taxa de inibição de 70% contra a *E. coli*. Essa maior susceptibilidade da bactéria gram-positiva estaria relacionada a diferenças na parede celular, fisiologia celular, metabolismo e grau de contato.

Em ambas as bactérias observou-se uma redução mínima entre a amostra tingida e não tingida, dado esse, incapaz de concluir alguma interferência da curcumina, visto que a mesma isoladamente não apresenta atividade inibitória. Outro dado observado foi o comportamento semelhante das diferentes fibras no ensaio, comprovando que os materiais têxteis apresentam um ambiente favorável para o crescimento e proliferação das bactérias (DE MAGALHÃES, 2015).

Com relação às concentrações de curcumina que apresentam atividade antimicrobiana, Nunez e colaboradores (2020) concluíram em seus experimentos que a curcumina em baixas concentrações tem efeito antibacteriano e antifúngico sobre cepas de *E. faecalis* (125 µg/mL), *E. coli* (31,2 µg/mL), *S. aureus* (31,2 µg/mL) e *C. albicans* (125 µg/mL). Entretanto, os mesmos autores observaram expressiva diferença nos resultados da Concentração Mínima Inibitória (CIM) da curcumina na literatura internacional publicada para as mesmas bactérias (TAJBAKSHI *et al.*, 2008; MUN *et al.*, 2013; GUNES *et al.*, 2016). Essa variabilidade se deve ao uso de vários métodos, diferentes preparações e concentrações de curcumina, bem como as variações de cultivo e *habitat* da cúrcuma (KALI *et al.*, 2016). RAHMAN *et al.* (2021), por sua vez, ao avaliarem as propriedades antimicrobianas de extrato de cúrcuma, observaram que o extrato exibiu atividades bactericidas contra *S. aureus* fornecendo CIM na faixa de 0,5 e 2 mg mL<sup>-1</sup>, valores superiores a curcumina.

A curcumina é uma substância com grande potencial, uma vez que diversos estudos internacionais comprovam seus efeitos antibacterianos e antifúngicos. Seu uso com a

combinação com outros antibióticos e até mesmo sua encapsulação para melhorar a estabilidade e solubilidade pode ser uma alternativa promissora para suas diversas atividades biológicas (WANG *et al.*, 2009; MOGHADAMTOUSI *et al.*, 2014). Por outro lado, os resultados desta pesquisa não puderam ser comparados com outros estudos, pois, até o momento, não há pesquisas publicadas sobre esse método de extração aplicado a materiais fibrosos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem concluir que a curcumina apresenta solubilidade em etanol facilitada na extração e dessorção, e cor amarela intensa nos tingimentos.

A extração da curcumina mostrou-se sensível as diferentes técnicas aplicadas. Entretanto, a metodologia de agitação à 60 °C apresentou melhor solubilidade e concentrações superiores à técnica de repouso. O mesmo foi observado para extração etanólica e maior proporção de cúrcuma na extração.

Os resultados de tingimento apresentaram percentual de esgotamento superior para a poliamida quando comparado ao algodão devido a afinidade iônica natural da poliamida com o corante da cúrcuma. O modelo de pseudo-segunda ordem foi o que melhor representou os dados cinéticos do tingimento, indicando que o tingimento pode ser controlado pelo processo de quimissorção. Nas isotermas de adsorção do tingimento, o melhor ajuste para o algodão foi o modelo de Freundlich indicando uma ligação fraca e a possibilidade da formação de multicamadas no tingimento. O modelo de Langmuir se ajustou a poliamida, com elevado fator de correlação, indicando uma distribuição uniforme e a interação de polaridade oposta.

Avaliando os parâmetros termodinâmicos obtidos para as fibras estudadas, conclui-se que o processo adsorptivo é de natureza exotérmica para a poliamida e endotérmica para o algodão, sendo a adsorção influenciada pela temperatura. Conclui-se, também, que o processo é não-espontâneo devido aos valores positivos de  $\Delta G^\circ$  obtidos nas três temperaturas para o algodão, e espontâneo para a poliamida, considerando reações exotérmicas ( $\Delta H < 0$ ).

A análise de FTIR com alterações de baixa intensidade nas amostras de poliamida tingida sugerem a existência de interações químicas entre o corante e fibra, diferentemente do algodão que não detectou interações na leitura. Por meio da análise de MEV não foi possível observar a presença de corante sobre a fibra que favorecesse ou não a dessorção.

Quando realizados os ensaios de dessorção das amostras tingidas, concluiu-se que os melhores resultados foram encontrados em maior proporção de volume de etanol (100%). A

poliamida apresentou uma liberação sustentada por 12 h mesmo em baixa quantidade adequando-se ao modelo de Higuchi, o qual sugere uma dessorção regida por difusão.

Em relação aos graus de solidez, elevada alteração de cor nos testes de solidez de cor à lavagem doméstica foram obtidos para ambas as fibras. Para a poliamida, os graus de solidez aos ensaios úmidos foram superiores ao algodão.

Os ensaios antimicrobianos das amostras tingidas contra as bactérias *E. coli* e *S. aureus* não mostraram atividade inibitória contra os microrganismos testados, sendo observado o aumento de número de bactérias na primeira hora e um aumento ainda mais expressivo em 24 h. Demonstrando que a concentração e/ou metodologia de extração utilizada no tingimento é ineficiente para atividades inibitórias do extrato da cúrcuma.

Apesar da linha de pesquisa em tingimento e dessorção com o corante natural da cúrcuma apresentar lacunas de pesquisa, sabe-se do aumento considerável no uso de produtos naturais e ecologicamente corretos na indústria têxtil e em demais áreas técnicas. Neste sentido, a cúrcuma, sendo um composto natural, não tóxico, e com comprovadas características colorísticas e terapêuticas, apresenta elevado potencial de pesquisa visto que, recentes estudos afirmam que o uso de corantes naturais está em ascensão e deverá encontrar mais investimentos para expansão de inovação e tecnologia na área têxtil.

Desenvolvimentos futuros podem ser realizados, e entre eles estão o estudo da influência de variáveis como pH, temperatura e uso de mordentes nos processos de tingimento, assim como na etapa de liberação e conseqüentemente em ensaios de solidez de cor das amostras tingidas. Além disto, é válido o estudo da viabilidade de proteção da curcumina como sistemas de encapsulação, trazendo mais estabilidade para este composto, evitando a rápida degradação e proporcionando uma liberação de maior controle. Por fim, sugere-se testar a curcumina isolado antes do tingimento, para estabelecer a concentração efetiva de atividade antimicrobiana e a técnica de utilização para preservar esta função.

## REFERÊNCIAS

- ABATE, M.T. *et al.* **Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO<sub>2</sub>** : Part I - Investigating colouration properties. *Journal of Supercritical Fluids*, v.152, p.104548, 2019.
- ABATE, M. T. *et al.* **Colouration and bio-activation of polyester fabric with curcumin in supercritical CO<sub>2</sub>** :Part II – Effect of dye concentration on the colour and functional properties. *Journal of Supercritical Fluids*, v.157, p.104703, 2020.
- AGGARWAL, B. B. *et al.* **Curcumin**: The Indian solid gold. The molecular targets and therapeutic uses of curcumin in health and disease, p. 1-75, 2007.
- AHANGARI, N. *et al.* **Curcumin in tissue engineering**: A traditional remedy for modern medicine. *BioFactors*, v. 45, n. 2, p. 135-151, 2019.
- AKBAR, M. U.*et al.* **Critical review on curcumin as a therapeutic agent**: From traditional herbal medicine to an ideal therapeutic agent. *Critical Reviews™ in Eukaryotic Gene Expression*, v. 28, n. 1, 2018.
- AKIRA, A. **The history of antimicrobial and antiodor**. Finished fabrics and the textile materials. In: SakagamiSuehara. *Functional fibers and finishes for humans*. Japan, v. 1, p. 21-27, 1995.
- ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. **A química do processamento têxtil**. *Química nova*. São Paulo, v.19, n.3, p.320-330, 1996.
- ALTMAN, A. *et al.* **Characterization of BspA, a major boiling-stable, water-stress-responsive protein in aspen (Populustremula)**. *Tree Physiology*, v. 15, n. 10, p. 673-678, 1995.
- AMMAYAPPAN, L.; MOSES, J. J. **Study of antimicrobial activity of aloe vera, chitosan, and curcumin on cotton, wool, and rabbit hair**. *Fibers and Polymers*, v.10, n.2, pp.161–166, 2009.
- AMMON, H. P. T.; WAHL, M. A. **Pharmacology of Curcuma longa**. *Planta Medica*, v.57, n.01, p.1–7, 1991.
- ANDIA, J. P. M. **Remoção de boro de águas e efluentes de petróleo por adsorção**. Rio de Janeiro, PUC-Rio, curso de Engenharia de Materiais, 2009.
- ANDRADE, R. R.; BEZERRA, F. M.; LANDIM, P. D. C. **Cadeia produtiva da moda: panorama e descrição**. *Projética, Londrina*, v.6, n.2, p. 87-104, 2015.

ARAIZA-CALAHORRA, A.; AKHTAR, M.; SARKAR, A. **Recent advances in emulsion-based delivery approaches for curcumin: From encapsulation to bioaccessibility.** Trends in Food Science and Technology, 71. p. 155-169. 2017.

ARAÚJO, A. E. M. **Corantes naturais para têxteis** – da Antiguidade aos tempos modernos. Conservar patrimônio. N. 3-4, p 39-51. 2006

ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. M. **Manual de Engenharia Têxtil.** v.2. Gulbenkian, Lisbon, 1986.

ASPLAND, J. R. **Colorants: Dyes.** Color for Science, Art and Technology. Amsterdam: Elsevier Science, p. 328–332.1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **PERFIL DO SETOR: DADOS GERAIS DO SETOR** (ATUALIZADOS EM FEVEREIRO DE 2022). 2022. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 04julho 2022.

AUGUSTO, S.P. C. **Análise da influência da  $\beta$ -ciclodextrina no tingimento de poliamida com corante ácido.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

AZARMI, R.; ASHJARAN, A. **Efeitos antibacterianos e propriedades de solidez do tecido de seda tingido com curcumina na presença de mordentes orgânicos e bio.** J New Technol Mater , v. 7, p. 56-66, 2017.

AZIZIAN, S. **Kinetic models of sorption: a theoretical analysis.** Journal of colloid and interface science, v. 276, n. 1, p. 47–52, 2004.

BARBIERI, J. C. *et al.* **Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições.** Revista de Administração de empresas, v.50, n2, p.146-154. São Paulo, 2010.

BAKAR, A. *et al.* **Comparative study of copper(II): curcumin complexes as superoxide dismutase mimics and free radical scavengers.** European Journal of Medicinal Chemistry, v. 42. pp. 431–439, 2007.

BARROS C. E. J. **A sustentabilidade Têxtil: Reaproveitamento de Resíduos da Indústria têxtil e vestuário (Estudo de casos de sistemas de gestão de resíduos têxteis no Brasil).** Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2016.

BASSANI, A. *et al.* **Propriedades mecânicas de blendas de nylon-6/Aceilonitrila-EPDM-Estireno (AES) compatibilizadas com copolímetro acrílico reativo (MMA-MA).** Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 12, n.2, p. 102-108, 2002.

BAUMAN, R. P. **Introdução ao equilíbrio termodinâmico.** São Paulo: E. Blucher, 1972.

- BECHTOLD, T.; MUSSAK, R. **Natural Colorants in Textile Dyeing**. Handbook of Natural Colorants. England: John Wiley & Sons Ltd. p. 315-335, 2009.
- BELLINI, P. *et al.* **Reference Books of 81 Textile Technologies - Finishing**. Milano: Fondazione ACIMIT, 2002.
- BEZERRA, F. M. **Liberção controlada do óleo essencial de citronela em matriz têxtil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá. 2016.
- BHARDWAJ, N.; DADSENA, U. **Extraction and evaluation of dyeing quality of natural curcumin**. Journal of Innovations in Applied Pharmaceutical Science (JIAPS) e-ISSN: 2455-5177. v.2, n.3, p.01-03, 2017.
- BIRD, R. B. STEWART, W. E. LIGHTFOOD E. N., **Fenômenos de Transporte**, LTC. São Paulo, 2004.
- BOATENG, J. S. *et al.* **Wound healing dressings and drugs delivery systems: a review**. Journal of Pharmaceutical sciences, v. 97, n8, p 2892 – 2923.2008.
- BOONJARASPINYO S. *et al.* **Indirect effect of a turmeric diet: enhanced bile duct proliferation in Syrian hamsters with a combination of partial obstruction by *Opisthorchis viverrini* infection and inflammation by *N*-nitrosodimethylamine administration**. Parasitology Research, v.108, p.7–14, 2011.
- BORGES, M. E. *et al.* **Natural dyes extraction from cochineal (*Dactylopius coccus*)**. New extraction methods. Food Chemistry, v.132, p. 1855-1860, 2012.
- BROADBENT, A. D. **Basic Principles of Textile Coloration**. England: Society of Dyers and Colourists, 2001.
- BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. **Adsorption of gases in multimolecular layers**. Journal of the American chemical society, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.
- BULUT, Y.; AYDIN, H. **A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells**. Desalination, v.194, p. 259–267, 2006.
- CAETANO, M. **Açafrão, o ouro da terra do Centro-Oeste**. Publicado em 07/11/2011. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI270195-18281,00-ACAFRAO+O+OURO+DA+TERRA+DO+CENTROOESTE.html>>. Acesso em: 27/05/2020.
- CARVALHO, V. A. M. *et al.* **Pesquisa da influência do ph, temperatura e tempo no alvejamento com hipoclorito de sódio**. Simpósio Internacional de Engenharia Têxtil Natal-RN-Brasil. 2000.

- CECILIO FILHO, A. B. *et al.* **Curcuma: planta medicinal, condimentar e de outros usos potenciais.** *Ciência Rural*, v. 30, n.1, p.171- 175, 2000.
- CERQUEIRA, A.; RUSSO, C.; MARQUES, M. R. C. **Electroflocculation for textilewastewatertreatment.** *BrazilianJournalOfChemicalEngineering*, Rio de Janeiro, v. 26, p. 659-668, 2009.
- CHAIRAT, M.; RATTANAPHANI, S.; BREMNER, J. B.; RATTANAPHANI, V. **An adsorption and kinetic study of lac dyeing on silk.** *Dyes and Pigments*, 64, 2005.
- CHATTOPADHYAY, I. *et al.* **Turmeric and curcumin: biological actions and medicinal applications.** *Current Science*, v. 87, n1.p.44-54, July, 2004.
- CLARK, M. **Handbook of Textile and Industrial Dyeing: Principles, processes and types of dyes.** Cambridge: WoodheadPublishing, 2011.
- CMMAD. **NossoFuturoComum.** New York: ONU, 1987.
- CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Nota Econômica: Indústria fica menos concentrada regionalmente.** n.19. ano 7, 2021. Disponível em: [https://fiegg.com.br/repositoriosites/repositorio/portalfiegg/download/Pesquisas/Nota\\_Economic\\_a\\_N\\_19\\_Industria\\_Fica\\_menos\\_Concentrada\\_Regionalmente.pdf](https://fiegg.com.br/repositoriosites/repositorio/portalfiegg/download/Pesquisas/Nota_Economic_a_N_19_Industria_Fica_menos_Concentrada_Regionalmente.pdf). Acesso em: 10/06/2021
- COPINI, M. S. *et al.* **Comportamento tintorial dos ésteres de luteína extraídos de Tagetes erecta L. no tingimento de substrato de algodão.** Dissertação de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.
- COSTA, M. Â. G. Desenvolvimento de têxteis com propriedades funcionais. 2018. Dissertação de Mestrado em Bioquímica em Saúde. Instituto Politécnico do Porto.
- COUTINHO, L. D. **Tecido de algodão funcionalizado com nanopartículas de prata visando produção de material bactericida.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.2018.
- CUSSLER, E. L. **Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems.** 3ª ed. New York: Cambridge University Press, 631, 2009.
- DA SILVA, M. G. *et al.* **Tingimento de têxteis com o corante natural extraído dos excrementos do bicho-da-seda.** 4o CONTEXMOD, v. 4, n. 1, 2016.
- DAOUD, W. A.; XIN, J.H.; SZETO, Y. S. **Polyethylenedioxythiophene coatings for humidity, temperature and strain sensing polyamide fibers.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 109, n. 2, p. 329-333, 2005.
- DE AGUIAR, C. R. L.; MISSNER, M. E. P.; DE AGUIAR, G. C. O. **Surface analysis on silk and cotton with natural dyeing.** XXXIX CBrAVIC, 2018.

DE MAGALHÃES, A. P. S. A. **Atividade antimicrobiana em têxteis**. Dissertação de mestrado (Controlo de qualidade na especialização de água e alimentos). Universidade do Porto. 2015.

DE SOUZA, A. U. **Têxteis antimicrobianos produzidos pela modificação superficial de tecidos de algodão e imobilização de enzima pectinolítica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.

DIAS, M. C. **Inovação tecnológica e relações interfirmas no cluster têxtil da região de Americana**. 1999. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) - Instituto de Geociência, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 119 págs. 1999.

DIVYA, R.; ASHOK, V. R. K.M. **CURCUMIN: The Golden Nutraceutical from the Most Powerful Herb in the Planet-Turmeric**. Chronic Complement Altern Integra Med: CCAIM-100004, v. 1. 2019.

DOCHIA, M. *et al.* **Cottonfibres**. In: Handbook of natural fibres. WoodheadPublishing, p. 11-232012.

DOTTO, G. L.; VIEIRA, M. G.; GONÇALVES, J. O.; PINTO, L. A. A. **Remoção dos corantes azul brilhante, amarelo crepúsculo e amarelo tartrazina de soluções aquosas utilizando carvão ativado, terra ativada, terra diatomácea, quitina e quitosana: estudos de equilíbrio e termodinâmica**. Química Nova, v. 34, n. 7, p. 1193–199, 2011.

EIGNER, D.; SCHOLZ, D. **Ferulaasa-foetida and Curcuma longa in traditional medicinal treatment and diet in Nepal**. Journal of ethnopharmacology, v. 67, n. 1, p. 1-6, 1999.

ELNAGAR, K.; ABOUELMAATY, T.; RAOUF, S. **Dyeing of polyester and polyamide synthetic fabrics with natural dyes using ecofriendly technique**. Journal of Textiles. 2014.

EL-SHISHTAWY, R. M. *et al.* **Dyeing of modified acrylic fibers with curcumin and madder natural dyes**. FibersandPolymers, v. 10, n. 5, p. 617-624, 2009.

EMAM, H. E. **Antimicrobial cellulosic textiles based on organic compounds**. 3 Biotech, v. 9, n. 1, p. 1-14, 2019.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **O mercado global do algodão: efeitos da pandemia decorrente do novo coronavírus**. By Fernando Mender Lamas. Publicado em 27/04/2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/51799538/artigo---o-mercado-global-do-algodao---efeitos-da-pandemia-decorrente-do-novo-coronavirus>. Acesso em: 15/06/2021.

EMPEL, C. *et al.* **Efeito antimicrobiano de plantas medicinais: uma revisão de estudos científicos**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais. v.10, n.4, 2019.

ESTEVEES, D. F. **Aperfeiçoamento das técnicas de avaliação da atividade antimicrobiana em produtos têxteis**. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior.2009.

FARIZADEH, K. *et al.* **Extraction, identification and sorption studies of dyes from madder on wool**.Journal of Applied Polymer Science, v.113, p. 3799-3888, 2009.

FARUK, M. O. *et al.***Functional textiles and composite based wearable thermal devices for Joule heating: progress and perspectives**. Applied Materials Today, v. 23, p. 101025, 2021.

FCEM. 2018. **5 curiosidades sobre o algodão que você precisa conhecer**.Publicado em 7 de agosto de 2018. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/curiosidades-sobre-o-algodao-que-voce-precisa-conhecer>.Acessoem: 13/06/21.

FCEM. 2019(a). **Como lidar com a demanda em excesso na produção têxtil**. Publicado em 23 de abril de 2019. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/como-lidar-com-a-demanda-em-excesso-na-producao-textil/> . Acesso em:28/07/2020.

FCEM. 2019(b). FEBRATEX GROUP. **Qual a importância da indústria têxtil no Brasil e o que representa?** Publicado em 11 de Junho de 2019. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/qual-a-importancia-da-industria-textil-no-brasil-e-o-que-representa/>. Acesso em: 10/06/2020.

FCEM. 2019(c). **Como desenvolver sustentabilidade na indústria têxtil? Descubra!** Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/como-desenvolver-sustentabilidade-na-industria-textil/> Acesso em:28/07/2020.

FCEM. 2019 (d)**Entenda a diferença entre poliéster e poliamida e conheça a função do elastano**. Publicado em 15 de novembro de 2019. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/diferenca-entre-poliester-e-poliamida-e-conheca-a-funcao-do-elastano>. Acesso em: 13/jun/2021

FCEM. 2020(a). FEBRATEX GROUP. **Indústria têxtil catarinense: entenda a importância desse pólo**. Publicado em 29 de Janeiro de 2020. Disponível em: <https://www.febratex.fcem.com.br/industria-textil-catarinense-entenda-a-importancia-desse-polo/>. Acesso: 10 jun. 2020.

FCEM. 2020(b). **Química na indústria têxtil: veja as soluções para sustentabilidade**. Disponível em: <https://fcem.com.br/noticias/quimica-na-industria-textil-veja-as-solucoes-para-sustentabilidade/> Acesso em:28/07/2020.

FERNANDES, A. F. H. *et al.***Produção de sistemas de liberação controlada: produção de gases reabsorvíveis funcionais para aplicações cirúrgicas**. Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica. Universidade Federal de Santa Catarina.2021.

FERREIRA, A. J. S.; FERREIRA, F. B. N.; OLIVEIRA, F. R. **Têxteis inteligentes** – Uma breve revisão da literatura. *Revista de design, inovação e gestão estratégica (REDIGE)*, V.5, N.1, abril, 2014.

FILGUEIRAS, A.; FANGUEIRO, R.; RAPHAELLI, N. **A importância de fibras e fios no design de têxteis destinados à prática desportiva**. *Estudos em Design*, v. 15, n. 1, 2007.

FORGIARINI, E. **Degradação de corantes e efluentes têxteis pela enzima horseradishperoxidase (HRP)**. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

FRANCIS, F.J. **Food colorants: anthocyanins**. *Reviews in Food Science and Nutrition*, v.28, n.4, p.273–314, 1989.

FREITAS F. U. S. G. **A problemática ambiental decorrente da produção têxtil em São Bento-PB no período de 2010 a 2017**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Cícó-RN, 2017.

FURMULY, A. M.; AZEMI, N. **A Review on Golden Species of Zingiberaceae Family Genus Curcuma**. *Science Proceedings Series*, v. 2, n. 2, p. 133-138, 2020.

GAO, A.; CHEN, H.; HOU A.; XIE, K. **Efficient antimicrobial silk composites using synergistic effects of violacein and silver nanoparticles**. *Materials Science & Engineering: C*, v. 103. 2019.

GIACOMINI, F. *et al.* **Análise da alteração de tonalidade em tecidos tintos com corantes naturais submetidos ao teste de solidez da cor à lavagem**. 3º CONTEXMOD, v. 1, n. 3, 2015.

GIACOMINI, F. **Tingimento de seda com corante natural erva-mate (*Ilexparaguariensis*)**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá.

GOËLO, V. *et al.* **Polysaccharide-based delivery systems for curcumin and turmeric powder encapsulation using a spray-drying process**. *Powder Technology*, v. 370, p. 137-146, 2020.

GOMIDE, R. **Manual de Operações Unitárias**. 2. ed. [s.l.] Edição do autor, 1991.

GONÇALVES, M. J. *et al.* **Estudo da viabilidade do tingimento da poliamida com corante natural de urucum**. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, p. 571-585, 2020.

GONZÁLEZ-ALBADALEJO, J. *et al.* **Curcumin and curcuminoids: chemistry, structural studies and biological properties**. *An. Real Acad. Nac. Farm*, v. 81, p. 278-310, 2015.

- GORINI, A. P. F.; SIQUEIRA, S. H. G. **Complexo Têxtil Brasileiro**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Comércio Exterior, 2002. Disponível em: <[www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecime nto/bnset/bsesptex.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecime nto/bnset/bsesptex.pdf)>. Acesso em: 07 mai.2020.
- GOVINDARAJAN, V.S. **Turmeric: chemistry, technology and quality**. Critical Review Food Science Nutrition, Boca Raton, v. 12, n. 3, p. 199-301, 1980.
- GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. **Corantes têxteis**. Revista Química Nova, São Paulo: v.3, n.1,p. 71-78, 2000.
- GULRAJANI, M. L. *et al.* **Kinetic and thermodynamic studies on red sandalwood**. 2002.
- GULRAJANI, M. L., GUPTA, D. MAULIK, S. R. **Studies on dyeing with natural dyes: part i -dyeing of annato on nylon and polyester**. Indian Journal of Fiber & Textile Research.V.24, pp. 131-135, 1999.
- GUNES, H. *et al.* **Antibacterial effects of curcumin: an in vitro minimum inhibitory concentration study**. Toxicology and industrial health, v. 32, n. 2, p. 246-250, 2016.
- HAJI, A.; BIDOKI, S. M.; GHOLAMI, F. **Isotherm and Kinetic Studies in Dyeing of Citric Acid-Crosslinked Cotton with Cationic Natural Dye**. Fibers and Polymers, v. 21, n. 11, p. 2547-2555, 2020.
- HAN, S.; YANG, Y. **Antimicrobial activity of wool fabric treated with curcumin**.Dyes and Pigments, v.64, p.157 e 161, 2005.
- HANG, C.; HE, J. **Study of the desorption of hydrolysed reactive dyes from cotton fabrics in an ethanol–water solvent system**. Coloration Technology, v. 130, n. 2, p. 81-85, 2014.
- HAQUE, A. N. M. A.*et al.* **Adsorption Kinetics of Curcumin on Cotton Fabric**.Tekstilec, v. 61 (2), 76-81, 2018 (a).
- HAQUE, A. *et al.* **Kinetic Study of Curcumin on Modal Fabric**. Tekstilec, v. 61, n. 1, 2018 (b).
- HARBS, A. H. R. **Uso de metal-β-ciclodextrina no tingimento têxtil**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Têxtil). Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- HASAN, M. M. *et al.* **Application of purified curcumin as natural dye on cotton and polyester**. International Journal of Engineering & Technology, v. 14, n. 05, p. 17-23, 2014.
- HIGUCHI, T. **Mechanism of sustained-action medication**. Theoretical analysis of rate of release of solid drugs dispersed in solid matrices. Journal of pharmaceutical sciences, v. 52, n. 12, p. 1145-1149, 1963.

HIGUCHI, T. **Rate of release of medicaments from ointment bases containing drugs in suspension.** Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 50, n. 10, p. 874–875, 1961.

HIMESH, S. *et al.* **Qualitative and quantitative profile of curcumin from ethanolic extract of *Curcuma longa*.** Int Res J Pharm, v. 2, n. 4, p. 180-184, 2011.

HIROKO, K. **Antimicrobial and antiodor finish.** Osaka: Senisha Inc., Japan, p. 48 e 54, 1990.

HO, Y. S.; MCKAY, G. **Pseudo-second order model for sorption processes.** Process Biochemistry, v. 34, n. 5, p. 451–465, 1999.

HOSSAIN, Md *et al.* **Adsorption, kinetics, and thermodynamic studies of cacao husk extracts in waterless sustainable dyeing of cotton fabric.** Cellulose, v. 28, n. 4, p. 2521-2536, 2021.

HUSSAIN, Z. *et al.* **Nanoencapsulation, an efficient and promising approach to maximize wound healing efficacy of curcumin: A review of new trends and state-of-the-art.** Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, v.150, 2017, p.223–241.

JIANG, T.; GHOSH, R.; CHARCOSSET, C. **Extraction, purification and applications of curcumin from plant materials**-A comprehensive review. Trends in Food Science & Technology, v. 112, p. 419-430, 2021.

JIWALAK, N.; RATTANAPHANI, S.; BREMNER, J. B.; RATTANAPHANI, V. **Equilibrium and kinetic modeling of the adsorption of indigo carmine onto silk.** FibersandPolymers, v. 11, n. 4, p. 572–579, 2010

KALAVATHY, M. H.; KARTHIKEYAN, T.; RAJGOPAL, S.; MIRANDA, L. R. **Kinetic and isotherm studies of Cu(II) adsorption onto H3PO4-activated rubber wood sawdust.**Journal of colloid and interface science, v. 292, n. 2, p. 354–362, 2005.

KALI, A. *et al.* **Antibacterial synergy of curcumin with antibiotics against biofilm producing clinical bacterial isolates.** Journal of basic and clinical pharmacy, v. 7, n. 3, p. 93, 2016.

KAMEL, M. M. *et al.* **Some studies on dyeing properties of cotton fabrics with *Curcuma Longa* (turmeric)(roots) using ultrasonic method.** Polish journal of applied chemistry, v. 52, n. 1-2, p. 101-121, 2008.

KANELLI, M.*et al.* **Surface modification of polyamide 6.6 fibers by enzymatic hydrolysis.** Process Biochemistry, v. 59, p. 97-103, 2017.

KANT, R. **Textile dyeing and printing industry: An environmental hazard.** Natural Science 4, v. 4, n. 1, p. 22-26, 2012.

- KHATTAB, T. A.; ABDELRAHMAN, M. S.; REHAN, M. **Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, n. 4, p. 3803-3818, 2020.
- KIM, H. J.; JANG, Y. P. **Direct analysis of curcumin in turmeric by DART-MS.** *Phytochemical Analysis*. v. 20, n. 5, p. 372-377, 2009.
- KORSMEYER, R. W. *et al.* **Mechanisms of solute release from porous hydrophilic polymers.** *International journal of pharmaceuticals*, v. 15, n. 1, p. 25-35, 1983.
- KŘÍŽOVÁ, H. **Natural dyes: Their past, present, future and sustainability.** *Recent developments in fibrous material science.* Czech Republic, Ed. Kanina, p. 59-71, 2015.
- KUASNE, A. **Fibras têxteis.** Apostila do curso têxtil em malharia e confecção. Módulo 2. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Araranguá-SC. 2008.
- KUHN, D. **Tingimento de algodão com corante reativo sem uso de sal por meio de cationização e aplicação de óleo de soja.** Trabalho de conclusão de curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina. 2019.
- KUHN, D.; DE AGUIAR, C. R. L. **Determinação do mecanismo de tingimento de corantes naturais, diretos, ácidos e catiônicos.** 6º CONTEXMOD, v. 1, n. 6, 2018.
- KUMAR, P. S. *et al.* **Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions.** *Desalination*, v.261, p. 52-60, 2010.
- LANGMUIR, I. **The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum.** *Journal of the American Chemical Society*, v.40, p.1361-1382, 1918.
- LEANDRO-SILVA, E. *et al.* **Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich no estudo da casca de banana como bioadsorvente de cobre (II) em meio aquoso.** *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.
- LEITNER, P.; FITZ-BINDER, C.; MAHMUDI-ALI, A.; BECHTOLD, T. **Production of a concentrated natural dye from Canadian Goldenrod (*Solidago canadensis*) extracts.** *Dyes and Pigments*, v.93, 2012.
- LEUNG, V.; HARTWELL, R.; YANG, H.; GHAHARY, A.; KO, F. **Bioactive Nanofibres for Wound Healing Applications.** *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, v. 1, n. 4, p. 1-14, 2011.
- LIEW, O.W. *et al.* **Signature optical cues: emerging technologies for monitoring plant health.** *Sensors*, v. 8, n. 5, p. 3205-3239, 2008.

- LIU, M.*et al.* **Eco-friendly curcumin-based dyes for supercritical carbon dioxide natural fabric dyeing.** *Journal of Cleaner Production*, v.197, p.1262 e 1267, 2018.
- LOBO, J. M. S. COSTA, P. **Modeling and comparison of dissolution profiles,** *Eur. J. Pharm. Sci.*, vol. 13, pp. 123–133, 2001.
- LOKHANDE, H. T.; DORUGADE, V.A. **Dyeing nylon with natural dyes.** *American dyestuff reporter*, v. 88, p. 29-34, 1999.
- LOPES, C. M.; LOBO, J. M. S.; COSTA, P. **Formas farmacêuticas de liberação modificada: polímeros hidrofílicos.** *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, v. 41, n. 2, p. 143–154, 2005.
- MAHAPATRA, N. N. **Textile Dyes.** Woodhead Publishing India in Textiles.2016.
- MAHESHWARI, R. K. *et al.* **Multiple biological activities of curcumin: a short review.** *Life sciences*, v. 78, n. 18, p. 2081-2087, 2006.
- MALEK, S. K.*et al.* **Adsorption and in vitro release study of curcumin form polyethyleneglycol functionalized multi walled carbon nanotube: kinetic and isotherm study.** *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 27, n. 1, p. 9-20, 2019.
- MARKOVIĆ, D.*et al.* **Development of material with strong antimicrobial activity by high pressure CO2 impregnation of polyamide nanofibers with thymol.** *Journal of CO2 Utilization*, v. 26, p. 19-27, 2018.
- MARMITT, D. J.; REMPEL, C.; GOETTERT, M. I.; SILVA, A. C. **Plantas medicinais da Relação Nacional de Plantas Medicinais de Interesse ao Sistema Único de Saúde com potencial antiparasitário.** *Scientia Amazonia*, v.4, n.3, p.5462, 2015.
- MARTÍ, M. *et al.* **Mathematical models for drug delivery from textile.** *Journal of Industrial Textiles*, 2019.
- MASSIMINO, L. C.; YOSHIOKA, S. A. **Nanopartículas de curcumina para liberação controlada.** Congresso Latino-Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 2016.
- MATHER, R. R.; WARDMAN, R. H. **The chemistry of textile fibres.** Royal Society of Chemistry, 2015.
- MEIZARINI, A.*et al.* **Anti-inflammatory properties of a wound dressing combination of zinc oxide and turmeric extract.** *Veterinary World*, v. 11, n. 1, p. 25, 2018.
- MENDES, A. P. P. **Cinética de liberação de clorexidina em nanocompósito de magnetita e quitosana.** 2019. Dissertação de mestrado em Química. Universidade Federal de São Carlos.

MENDES, S. S. **Libertação controlada de salicilato de metila em estruturas têxteis: desenvolvimento e caracterização.** Tese de Doutorado Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, 2020.

MENEGAZZO, M. A. B. **Estudo do tingimento de lã com corante natural de camomila (*matricaria recutita* L.).** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá. 2014.

MI, F. *et al.* **Control of wound infections using a bilayer chitosan wound dressing with sustainable antibiotic delivery.** Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, v. 59, n. 3, p. 438-449, 2002.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Monografia da espécie *Curcuma longa* L. (CURCUMA).** Brasília- Brasil, 2015.

MIRJALILI, M.; KARIMI, L. **Antibacterial dyeing of polyamide using turmeric as a natural dye.** AUTEX Research Journal, Vol. 13, n. 2, 2013.

MOODY'S INVESTORS SERVICE REPORT. **Indústria da moda é a que mais gasta água a nível mundial, depois da agricultura.** 2021. Disponível em: <<https://eco.sapo.pt/2021/04/09/industria-da-moda-e-a-que-mais-gasta-agua-a-nivel-mundial-depois-da-agricultura/>> Acesso em: 04 jul 2022.

MOGHADAMTOUSI, S. Z. *et al.* **A review on antibacterial, antiviral, and antifungal activity of curcumin.** BioMed Research International. Hindawi Publishing Corporation. v.14. 2014.

MOHANTY, C.; SAHOO, S. K. **Curcumin and its topical formulations for wound healing applications.** Drug Discovery Today. v.22, n. 10. p.1582-1592. 2017.

MORAIS, A. V. *et al.* **Toxicidade do efluente e consumo hídrico e energético no tingimento de poliamida.** Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia Volume 8, Ed. 1 capítulo 9. 2021.

MUN, S. *et al.* **Synergistic antibacterial effect of curcumin against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*.** Phytomedicine, v. 20, n. 8-9, p. 714-718, 2013.

NACHIMUTHU, S. *et al.* **In vivo wound healing study of chitosan turmeric films in rat model.** Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, v. 11. p.268 – 273. 2018.

NAMANE, A. *et al.* **Determination of the adsorption capacity of activated carbon made from coffee grounds by chemical activation with ZnCl<sub>2</sub> and H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.** Journal of hazardous materials, v. 119, n. 1-3, p. 189–94, 2005.

NARIMATSU, B. M. G. *et al.* **Corantes naturais como alternativa sustentável na indústria têxtil.** Revista Valore, v. 5, p. 5030, 2020.

NELSON, K. M. *et al.* **The Essential Medicinal Chemistry of Curcumin.** Journal of Medicinal Chemistry.v.60, p.1620-1637. 2017.

NETTO, R.C.M. **Dossiêcorantes.** Food Ingredients Brasil, v. 9, p. 40-47, 2009.

NOORAFSHAN, A.; ASHKANI-ESFAHANI, A. **A review of therapeutic effects of curcumin.** Current Pharmaceutical Design, v.19.n.11, p. 2032-2046, 2013.

NÚÑEZ, A. A. S. *et al.* **Efecto antimicrobiano de curcumina sobre Enterococcus faecalis, Escherichia coli, Staphylococcus aureus y Candida albicans.** Nova scientia, v. 12, n. 25, 2020.

NWOKONKWO, D. C. **Utilization of Dyes from Local Plant Materials-BaphiaNitida (Red and Yellow Camwood), Curcuma Lunga (Turmeric) and Tectona Grandis (Teak Leaves) as Fabric Dyes.** Orient J Chem; 36(3); 2020.

OLIVEIRA, D. E. C. *et al.* **Thermodynamic properties of maize grains for different equilibrium moisture contents.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 43, n. 1, p. 50-56, 2013.

OVINGTON, L. G. **Advances in wound dressings.** Clinics in dermatology, v. 25, p. 33-38, 2007.

ÖZCAN, A. S.; ÖZCAN, A. **Adsorption of acid dyes from aqueous solutions onto acidactivatedbentonite.** Journal of Colloid and Interface Science, v. 276, n. 1, p. 39-46, 2004.

PAINTER, P. C. *et al.* **Fundamentos de ciencia de polimeros: un texto introductorio.** CRC Press, 1st Edition, 1996.

PANKONGADISAK, P. *et al.* **The use of electrospun curcumin-loaded poly(L-lactic acid) fiber mats as wound dressing materials.** Journal of Drug Delivery Science and Technology, v.53, p.101121, 2019.

PARIZE, A. L. **Desenvolvimento de sistemas microparticulados e de filmes a base de quitosana e corante natural cúrcuma.** Tese de doutorado em Química, Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.

PARVINZADEH, M.; ASSEFIPOUR, R.; KIUMARSI, A. **Biohydrolysis of nylon 6, 6 fiber with different proteolytic enzymes.** Polymer Degradation and Stability, v. 94, n. 8, p. 1197-1205, 2009.

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. Woodhead Publishing, p. 177-198. 2013.

- PAULUCCI, V. P. *et al.* **Optimization of the extraction of curcumin from *Curcuma longa* rhizomes.** Revista Brasileira de Farmacognosia, v. 23, p. 94-100, 2013.
- PEIXOTO, F.; MARINHO, G.; RODRIGUES, K. **Corantes têxteis: uma revisão.** Holos, v. 5, p. 98-106, 2013.
- PÉRET-ALMEIDA, L. *et al.* **Atividade antimicrobiana in vitro do rizoma em pó, dos pigmentos curcuminóides e dos óleos e dos essenciais da *Curcuma longa* L.** Ciência e agrotecnologia, v. 32, p. 875-881, 2008.
- PERKINS, W. S. **Textile Coloration and Finishing.** Durham: Carolina Academic Press, 1996.
- PICCOLI, H. H. **Determinação do comportamento tintorial de corantes naturais em substratos de algodão.** Dissertação de mestrado (Engenharia Química). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- PORTELLA, E. H. *et al.* **Influence of stacking sequence on the mechanical and dynamic mechanical properties of cotton/glass fiber reinforced polyester composites.** Materials Research, v. 19, p. 542-547, 2016.
- PRATUMYOT, K. *et al.* **Dyeing of cotton with the natural dye extracted from waste leaves of green tea (*Camellia sinensis* var. *assamica*).** Coloration Technology, v. 135, n. 2, p. 121-126, 2019.
- PRIYADARSINI, K. I. **Photophysics, photochemistry and photobiology of curcumin: studies from organic solutions, bio-mimetics and living cells.** Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, v. 10, n. 2, p. 81-95, 2009.
- QUEIROZ M.T.A. *et al.* **Gestão de resíduos na indústria têxtil e sua relação com a qualidade da água: estudo de caso.** Revista Iberoamericana de engenharia industrial, v.8,n.15.p 114-135, Florianópolis, SC,Brasil.2016.
- RAHMAN, A. N. A. A. *et al.* **Anti-microbial Properties of Turmeric Extracts Against Common Oral Pathogens as a Potential Therapeutic Alternative in Dentistry.** In: Enhancing Halal Sustainability. Springer, Singapore, 2021. p. 287-293.
- RAJENDRA, R. *et al.* **Use of zinc oxide nano particles for production of antimicrobial textiles.** International Journal of Engineering, Science and Technology, v. 2, n. 1, p. 202-208, 2010.
- RAMACHANDRAN, T.; RAJENDRAKUMAR, K.; RAJENDRAN, R. **Antimicrobial textiles—an overview.** Journal of the Institution of Engineers, v. 84, n. 2, p. 42-47, 2004.

RAMLOW, H. **Destilação por membrana aplicada ao tratamento de águas residuais da indústria têxtil**. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

REDDY, N. *et al.* **Antimicrobial activity of cotton fabrics treated with curcumin**. Journal of Applied Polymer Science. v. 127, n. 4, p. 2698-2702, 2013.

RIVERO, P. J. *et al.* **Nanomaterials for functional textiles and fibers**. Nanoscale research letters, v. 10, n. 1, p. 1-22, 2015.

RODRIGUES, J. A. R. **Uso de corantes de origem natural para o tingimento de artigos têxteis de moda**. Dissertação de mestrado (Ciências). Universidade de São Paulo, 2013.

ROUETTE, H. K. **Eyclopedia of textile finishing**, Springer, 2000.

RUDRAPPA, T.; BAIS H. P. **Curcumin, a known phenolic from *Curcuma longa*, attenuates the virulence of *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 in whole plant and animal pathogenicity models**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol.56, n. 6, p. 1955–1962, 2008.

RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. New York: Wiley, 1984.

SACHAN, K.; KAPOOR, V. P. **Optimization of extraction and dyeing conditions for traditional turmeric dye**. Indian Journal of Traditional Knowledge, v.6, n.2, p.270-278, 2007.

SADEGHI-KIAKHANI, M. **Eco-friendly dyeing of wool and nylon using madder as a natural dye: kinetic and adsorption isotherm studies**. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 12, n. 7, p. 2363-2370, 2015.

SADEGHI-KIAKHANI, M.; SAFAPOUR, S. **Improvement of dyeing and antimicrobial properties of nylon fabrics modified using chitosan-poly (propylene imine) dendreimer hybrid**. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 33, p. 170-177, 2016.

SADEGHI-KIAKHANI, M.; SAFAPOUR, S.; MIRNEZHAD, S. **Thermodynamic and kinetic studies of the adsorption behaviour of the natural dye cochineal on polyamide 66**. Coloration Technology, v. 134, n. 4, p. 308-314, 2018.

SAJITHLAL, G. B.; CHITTRA, P.; CHANDRAKASAN, G. **Effect of curcumin on the advanced glycation and cross-linking of collagen in diabetic rats**. Biochemical pharmacology, v. 56, n. 12, p. 1607-1614, 1998.

SALEH, S. M.; MOHAMED, H. A. **Effect of Natural Mordant on Dyeing Process of Some Egyptian Cotton Fabrics Using Natural Dye**. Int. J. Adv. Sci. Eng, v. 6, n. 2, p. 1370-1375, 2019.

- SALEM, Vidal. **Tingimento Têxtil: Fibras, Conceitos e Tecnologias**. São Paulo: Blucher:GoldenTecnologia, 2010.
- SAMANTA, A. K.; AGARWAL, P. **Application of natural dyes on textiles**. Indian Journal of Fibre & Textile Research. v. 34, p. 384–399, 2009.
- SAMANTA, A. K.; KONAR, A. **Dyeing of textiles with natural dyes**. Natural dyes, v. 3, n. 30-56, University of Calcutta, India, 2011.
- SAVALE, S. K. **Curcumin as a model drug: conformation, solubility estimation, morphological, in vitro and in vivo biodistribution study**. Journal of PharmaSciTech, v. 7, p. 31-35, 2017.
- SCHINDLER, W. D.; HAUSER, P. J. **Chemical finishing of textiles**. The textile Institute. Woodhead Publishing Ltd. Cap 15, p165-174.2005.
- SCHIOZER, A. L.; BARATA, L. E. S. **Estabilidade de Corantes e Pigmentos de Origem Vegetal**. Revista Fitos, Junho 2007.
- SCREMIN, L.B. *et al.* **Adsorção de corantes têxteis aniônicos e catiônicos em resíduos do processamento de fios de algodão modificados quimicamente**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- SHIRVAN, A. R.; NOURI, A. **Medical textiles**. Advances in functional and protective textiles, p. 291-333, 2020
- SIEPMANN, J., PEPPAS, N.A. **Modeling of drug release from delivery systems based on hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)**. Advanced Drug Delivery Reviews, v. 48, p. 139-157, 2001.
- SILVA, L. T. **Utilização de enzima no pré-tratamento de substrato têxtil de poliamida 6.0**. Monografia (Engenharia Têxtil). Universidade Federal de Santa Catarina. 2019.
- SILVA, M. C. *et al.* **Avaliação do método de obtenção de scaffolds quitosana/curcumina sobre a estrutura, morfologia e propriedades térmicas**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, p. 560-568, 2016.
- SILVA, M. G. **Tingimento de seda e lã com corante natural eucalipto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá. 2013.
- SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. In: Identificação espectrométrica de compostos orgânicos. 2007. p. 490-490.

SINGH, P. K. *et al.* **From micron to nano-curcumin by sophorolipid co-processing: highly enhanced bioavailability, fluorescence, and anti-cancer efficacy.** RSC Advances, v. 4, n. 104, p. 60334-60341, 2014.

SINHA, D.; DE, D.; AYZAZ, A. **Performance and stability analysis of curcumin dye as a photosensitizer used in nanostructured ZnO based DSSC.** Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 193. 467-474. 2018.

SINHA, M. *et al.* **Study of the mechanism of action of curcumin; an antiulcer agent.** Indian J. Pharmacol, v. 7, p. 98, 1975.

SIPS, R. **Combined form of Langmuir and Freundlich equations.** Journal of Chem Phys, v. 16, p. 490-495, 1948.

SOGLI, D. S. *et al.* **Effect of extraction parameters on curcumin yield from turmeric.** Journal of food science and technology, v. 47, n. 3, p. 300-304, 2010.

ŠTĚPÁNKOVÁ, M.; WIENER, J.; RUSINOVÁ, K. **Decolourization of vat dyes on cotton fabric with infrared laser light.** Cellulose, v. 18, n. 2, p. 469-478, 2011.

STEPOVA, K.; SYSA, L.; KONANETS, R. **Nonlinear Fitting of Iron Sorption on Bentonite to Theoretical Isotherm Models.** Physics and Chemistry of Solid State, v. 23, n. 2, p. 270-276, 2022.

STRINGHETA, P.C. **Uso e aplicação de corantes naturais.** Apresentação realizada no evento sobre “Corantes artificiais e naturais em alimentos”. 19 de abril de 2007, ITAL, Campinas, 2007.

SUN, G. WORLEY, S. D. **Chemistry of durable and regenerable biocidal textiles.** Journal of Chemical Education. v. 82. n.1. 2005.

SUN, G.; KIM, Y. H. **Durable antimicrobial finishing of Nylon fabrics with acid dyes and quaternary ammonium salt.** Textile Research Journal, v. 71, n. 4, p. 318-323. 2001.

SUN, Y.; LIU, D.; CHEN, J.; YE, X.; YU, D. **Effects of different factors of ultrasound treatment on the extraction yield of the all-trans- $\beta$ -carotene from citrus peels.** Ultrasonics Sonochemistry, 18, p. 243-249, 2011.

SWOFFORD, H. W. **An overview of antimicrobial testing for textile applications.** AATCC review: the magazine of the textile dyeing, printing, and finishing industry, v. 10, n. 6, p. 51-55, 2010.

TAJBAKHSI, S. *et al.* **Antibacterial activity of indium curcumin and indium diacetylcurcumin.** African Journal of Biotechnology, v. 7, n. 21, 2008.

THAKUR, R.; PURI, H. S.; HUSAIN, A. **Major medicinal plants of India**. Lucknow, India: Central Institute of Medicinal and Aromatic Plants, 1989. p. 585.

TIWARI, H. C.; SINGH, P.; MISHRA, P. K.; SRIVASTAVA, P. **Evaluation of various techniques for extraction of natural colorants from pomegranate rind** – Ultrasound and enzyme assisted extraction. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, India, v.35, p. 272-276, 2010.

TREVISOL, T. C. *et al.* **Filmes em mono e bicamada de alginato e carboximetilcelulose com liberação controlada de diclofenaco de sódio**. Dissertação de mestrado em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

TROTMAN, E. R. **Dyeing and Chemical Technology of Textile Fibres**. 4.ed. Londres: Charles Griffin & Company, 1970.

UMBREEN, S. *et al.* **Dyeing properties of natural dyes extracted from turmeric and their comparison with reactive dyeing**. *Research Journal of Textile and Apparel*, v. 12 n. 4, 2008.

UYEN, N. T. T. *et al.* **Synthesis and characterization of curcumin loaded alginate microspheres for drug delivery**. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, v.58, p.101796, 2020.

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

VANKAR, P. S. **Handbook on natural dyes for industrial applications**. India: National Institute of Industrial Re, 2007.

VAN NONG, H. *et al.* **Fabrication and vibration characterization of curcumin extracted from turmeric (*Curcuma longa*) rhizomes of the northern Vietnam**. *Springerplus*, v. 5, n. 1, p. 1-9, 2016.

VARESANO, A. *et al.* **Multifunctional cotton fabrics**. *Synthetic Metals*, v. 159, n. 11, p. 1082-1089, 2009.

VASHISHTHA, M. **Effect of various dyeing conditions on pure natural yellow dye from Turmeric for dyeing of wool yarn**. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, v.2. p.342- 350.2018.

VELMURUGAN, P.; TAMILSELVI, A. **The use of cochineal and *Monascus purpureus* as dyes for cotton fabric Coloration Technology**. *Coloration Technology*, v. 129, p. 246– 251, 2013.

VENKATASUBBU, G. D.; ANUSUYA, T. **Investigation on curcumin nanocomposite for wound dressing**. *International Journal of Biological Macromolecules* 98, 366-378.2017.

VIGO, T. L. **Textile processing and properties: preparation, dyeing, finishing and performance.** Textile Science and Technology, Elsevier Science, 1994.

VINOD, K. N. *et al.* **Extraction, identification and adsorption-kinetic studies of a natural color component from *G. sepium*.** Natural Science, v.2, n.5, p. 469-475, 2010.

VINOD, K. N.; PUTTASWAMY. **Kinetic and adsorption studies of Indian siris (*Albizia lebbek*) natural dye on silk.** Indian Journal of Fibre & Textile Research, India, v.35, p.159-163, 2010.

WANG, J.; GUO, X. **Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method.** Chemosphere, v. 258, p. 127279, 2020.

WANG, Y. *et al.* **Study on the antibiotic activity of microcapsule curcumin against foodborne pathogens.** International journal of food microbiology, v. 136, n. 1, p. 71-74, 2009.

WU, J. *et al.* **Brewer's grains with different pretreatments used as bio-adsorbents for the removal of Congo red dye from aqueous solution.** BioResources, v. 15, n. 3, p. 6928-6940, 2020.

WU, J. *et al.* **Studies on kinetic and thermodynamic parameters of natural dye curcumin on PLA fibre.** Indian Journal of Fibre & Textile Research, v.38, p.424,426, 2013.

XIE, X. *et al.* **Fabrication and drug release properties of curcumin-loaded silk fibroin nanofibrous membranes.** Adsorption Science & Technology, v. 37, p.412–424.2019.

YANG, Y.; COROCRAN, L.; VORLICEK, K.; LI, S. **Durability of some antibacterial treatments to repeated laundering.** Textile Chemist & Colorist & American Dyestuff Reporter, v. 32, n. 4, p.48-54, 2000.

YOO, H. J.; JEON, S. T. **Dyeing properties of yerba mate tea on the fabrics.** Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles, v. 36, n. 4, p. 412–421, 2012.

YOUSSEF, A. M.; EL-NABARAWY, Th; SAMRA, S. E. **Sorption properties of chemically-activated carbons: 1. Sorption of cadmium (II) ions.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 235, n. 1-3, p. 153-163, 2004.

YUSUF, M.; SHABBIR, M.; MOHAMMAD, F. **Natural colorants: Historical, processing and sustainable prospects.** Natural products and bioprospecting, v. 7, n. 1, p. 123-145, 2017.

ZAMRI, T. K. A. T. M.; ABD MUNAIM, M. S.; AB WAHID, Z. **Adsorption and kinetic studies of a natural dye from *Curcuma Longa L.*, onto bamboo yarn.** Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology, v. 2, n. 1, p. 13-26, 2017.

ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. **Corantes:** caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento. Editora Cultura Acadêmica. p17-35.2016.

ZERIN, I. *et al.* Potentials of natural dyes for textile applications. 2019

## ANEXO A – Certificado de análise da curcumina

 **Active Pharmaceutica**  
ANÁLISES E CERTIFICAÇÃO DE QUALIDADE FARMACÉUTICA

### CERTIFICADO DE ANÁLISES 02/21

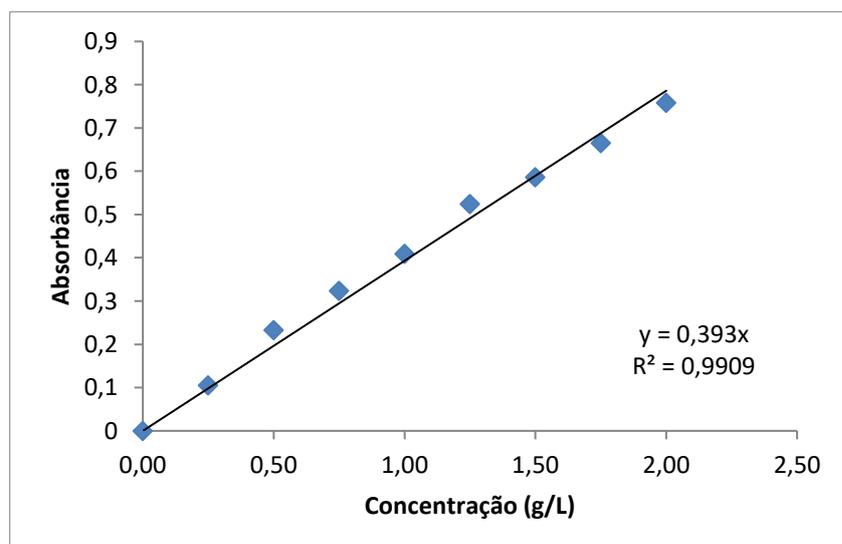
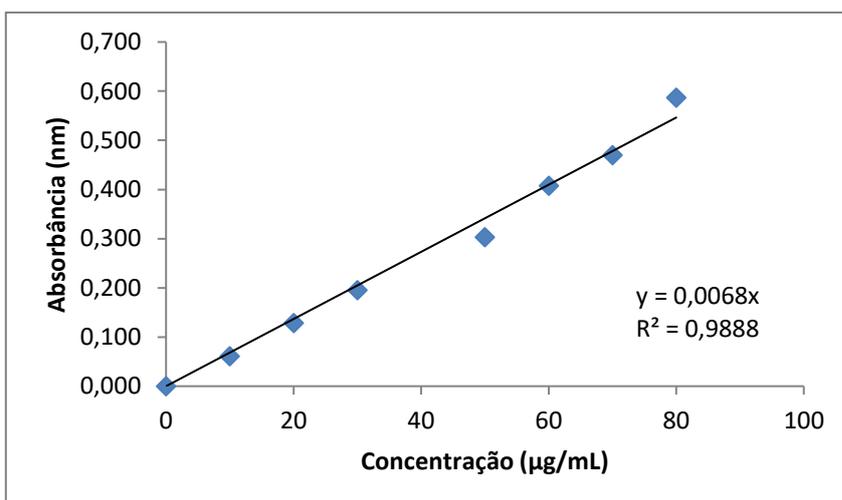
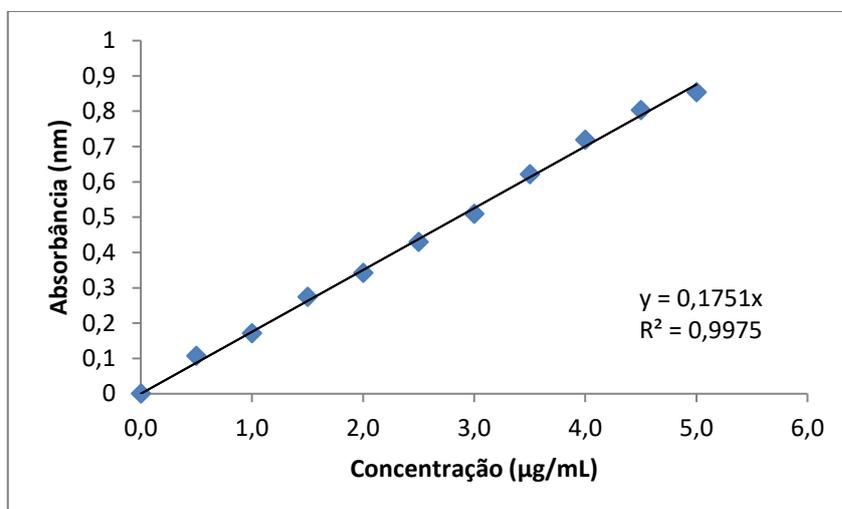
**INSUMO: CÚRCUMA LONGA EXTRATO (95% CURCUMINÓIDES)**

NOME BOTÂNICO: *Curcuma longa*      MARCADOR ATIVO: Curcuminóides  
CAS: 84775-52-0      PARTE UTILIZADA: Raiz      SOLVENTE: Etanol e acetato de etila  
ORIGEM: China      FABRICANTE: Suzhou Vitajoy Bio-Tech  
LOTE FABRICANTE: C1-0320-200801      LOTE PRODUÇÃO: 0723/0421  
FABRICAÇÃO: 01/08/2020      VALIDADE: 31/07/2022

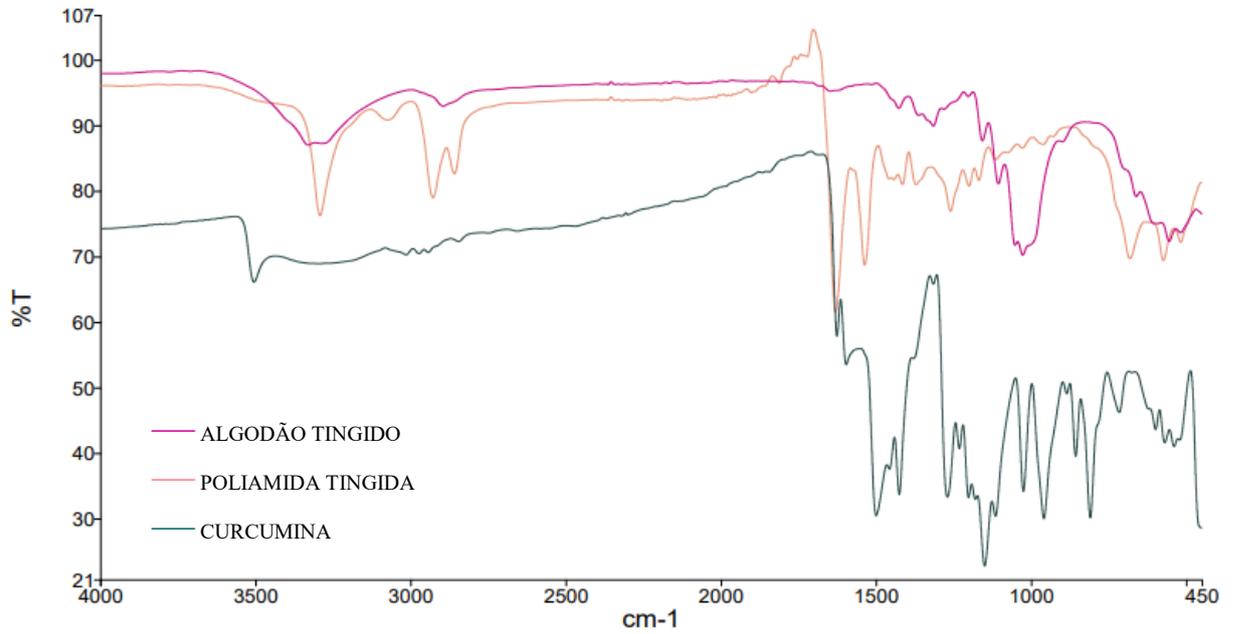
ANÁLISE	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS	REFERÊNCIA
Descrição	Visual	Pó amarelo-alaranjado	Conforme*	Fabricante
Identificação	HPLC	Positivo	Conforme**	USP 40
Teor (base seca)	HPLC	Curcuminóides ≥ 95,0%	97,94 %**	USP 40
		Curcumina: 70,0 % - 80,0 %	74,57 %**	
		Desmetoxicurcumina: 15,0 % - 25,0 %	17,34 %**	
		Bisdesmetoxi curcumina: 2,5 % - 6,5 %	6,03 %**	
Solubilidade	FB 6 <Solubilidade>	Informativo	Insolúvel em água; insolúvel em etanol	-
Faixa de fusão	USP <741>	172 – 178 °C	173,5 – 174,1 °C*	USP 40
Densidade aparente	Densímetro	Informativo	0,32 g/cm <sup>3</sup> **	-
Perda por dessecação	1 g/105 °C/2 h	≤ 2,0 %	0,19 %*	USP 40
Cinzas sulfatadas	1 g/550 °C/peso constante	≤ 1,0 %	0,02 %*	Fabricante
Tamanho de partícula	Tamís	≥ 80 % passa em malha 80	98,53 %**	Fabricante
Metais pesados	Abs. atômica	≤ 10 mg/kg	< 10 mg/kg**	Fabricante
Arsênio	Abs. atômica	≤ 1 mg/kg	< 1 mg/kg**	Fabricante
Chumbo	Abs. atômica	≤ 1 mg/kg	< 1 mg/kg**	Fabricante
Cádmio	Abs. atômica	≤ 1 mg/kg	< 1 mg/kg**	Fabricante
Mercúrio	Abs. atômica	≤ 0,1 mg/kg	< 0,1 mg/kg**	Fabricante
Solventes orgânicos residuais totais	CG	≤ 5000 ppm	3672,8 ppm**	Fabricante
Pesticidas residuais	CG	Atende aos requisitos USP	Conforme**	Fabricante
Aflatoxinas	AOAC	Negativo	Conforme**	Fabricante
Contagem total de bactérias aeróbias	USP <2021>	≤ 10 <sup>6</sup> UFC/g	Conforme*	USP 40
Contagem total de fungos	USP <2021>	≤ 10 <sup>5</sup> UFC/g	Conforme*	USP 40

Avenida das Universidades, 453 - Pedra Branca - Palhoça - SC | CEP 88137-315  
Tel. 0800 001 1313 | (48) 2132-2899 | Whatsapp: (48) 98835-2603  
www.activepharmaceutica.com.br | CNPJ 08.026.759/0001-18

**APÊNDICE A – Curva de calibração da curcumina em etanol, cúrcuma em etanol, e solução de tingimento 10% (v/v) respectivamente**



**APÊNDICE B – Resultado da Análise FTIR do algodão e poliamida tingidos e curcumina**



**APÊNDICE C – Resultado da Análise por FTIR de malha de poliamida alvejada e tingida com extrato de cúrcuma**

