



FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA “MINISTRO RALPH BIASI”

Curso Superior De Tecnologia Em Produção Têxtil

TASSIANE REGINA DOS SANTOS

ESTUDO COMPARATIVO DA FIXAÇÃO DE CORANTES REATIVOS EM TECIDOS DE
ALGODÃO: INFLUÊNCIA DO TIPO DE ÁLCALI, TEMPERATURA E TEMPO DE
PROCESSAMENTO"

AMERICANA, SP

2025

TASSIANE REGINA DOS SANTOS

ESTUDO COMPARATIVO DA FIXAÇÃO DE CORANTES REATIVOS EM TECIDOS DE
ALGODÃO: INFLUÊNCIA DO TIPO DE ÁLCALI, TEMPERATURA E TEMPO DE
PROCESSAMENTO"

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido
em cumprimento à exigência curricular do Curso
Superior de Tecnologia em Produção Têxtil pelo
CEETEPS / Faculdade de Tecnologia – FATEC/
Americana – Ministro Ralph Biasi.

Área de concentração: Química Têxtil

Orientador: Prof. Dr. Daives Arakem
Bergamasco

AMERICANA, SP

2025

**FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec Americana
Ministro Ralph Biasi- CEETEPS Dados Internacionais de
Catalogação-na-fonte**

SANTOS , Tassiane Regina

Estudo comparativo da fixação de corantes reativos em tecidos de algodão: Influência do tipo de álcali, temperatura e tempo de processamento . / Tassiane Regina Santos – Americana, 2025.

118f.

Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil) - - Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

Orientador: Prof. Dr. Daives Araken Bergamasco

1. Corantes 2. Química têxtil 3. Tingimento. I. SANTOS , Tassiane Regina II. BERGAMASCO , Daives Araken III. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi

CDU: 677.027.42

66:677

677.027.4

Elaborada pelo autor por meio de sistema automático gerador de ficha catalográfica da Fatec de Americana Ministro Ralph Biasi.

Tassiane Regina dos Santos

**ESTUDO COMPARATIVO DA FIXAÇÃO DE CORANTES REATIVOS
EM TECIDOS DE ALGODÃO: INFLUÊNCIA DO TIPO DE ÁLCALI,
TEMPERATURA E TEMPO DE PROCESSAMENTO**

Trabalho de graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Têxtil pelo Centro Paula Souza –Faculdade de Tecnologia de Americana – Ministro Ralph Biasi.
Área de concentração: Química Têxtil

Americana, 05 de dezembro de 2025

Banca Examinadora:


Daives Araken Bergamasco
Doutor

Fatec Americana – Ministro Ralph Biasi.


Kellen Manoela Siqueira (Membro)
Doutora
Fatec Americana – Ministro Ralph Biasi.


José Antonio Della Negra (Membro)
Especialista
Fatec Americana – Ministro Ralph Biasi.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, à força maior que sempre guiou meus passos, iluminou meus caminhos e me sustentou nos momentos de cansaço, dúvida e superação. Sem essa energia que me acompanha, nada disso teria sido possível.

Agradeço profundamente à minha família, que foi minha base, meu suporte e minha motivação diária. Cada palavra de carinho, cada gesto de apoio e cada demonstração de confiança em mim fizeram toda a diferença durante essa jornada.

Registro também minha sincera gratidão à Faculdade de Tecnologia de Americana – Ministro Ralph Biasi, pela formação que recebi e pela oportunidade de construir este trabalho dentro de um ambiente que valoriza o conhecimento científico.

À empresa onde trabalho, deixo um agradecimento especial por ter permitido o uso do laboratório, dos equipamentos e de todos os recursos necessários para a realização dos testes que fundamentaram este estudo. Essa contribuição foi essencial para que meu TCC pudesse se desenvolver com qualidade e profundidade.

Aos meus colegas de trabalho, que estiveram comigo durante todo o processo: obrigada por cada ajuda oferecida, cada dúvida esclarecida, cada conversa técnica e cada incentivo nos dias mais difíceis. Vocês fizeram parte dessa conquista.

E, em especial, deixo meu agradecimento ao meu orientador, Professor Daives Arakem Bergamasco, pelo suporte constante, pela paciência, pelas orientações precisas e pela confiança no meu potencial. Seu acompanhamento foi fundamental para que este trabalho tomasse forma e se aprimorasse a cada etapa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta realização, deixo meu carinho e gratidão.

Toda cor aplicada é uma história química: da fibra ao reativo, da condição ao resultado

- Autor desconhecido

RESUMO

O presente trabalho aborda a otimização do processo de tingimento reativo de algodão Mercerizado com o corante bifuncional Corafix Vermelho ME-4B 150%, tema de relevância significativa para a indústria têxtil contemporânea, considerando a importância de aprimorar a qualidade colorimétrica, a solidez de cor e a sustentabilidade ambiental dos processos de tingimento. Objetivou-se identificar as condições ótimas de operação do processo de tingimento por esgotamento, investigando sistematicamente a influência de três variáveis críticas — tipo de álcali (carbonato de sódio, bicarbonato de sódio e hidróxido de sódio), temperatura (20°C, 60°C e 90°C) e tempo de processamento (20, 40 e 60 minutos) — sobre as propriedades coloriméricas das fibras tingidas. A metodologia empregada consistiu em um design experimental fatorial, no qual amostras de algodão foram submetidas ao processo de tingimento sob diferentes combinações das variáveis estudadas, seguido de análise espectrofotométrica de cor utilizando o sistema CIELAB para obtenção de parâmetros como Delta E, saturação, matiz e metamerismo, além de testes de solidez de cor conforme as normas ISO 105-X12 (fricção) e ISO 105-C06 (lavagem a frio). Os resultados evidenciaram que as condições ótimas para o tingimento são obtidas com a utilização de carbonato de sódio como álcali, temperatura de 20°C e tempo de 60 minutos, condições que proporcionam imperceptível diferença de cor ($\Delta E = 0,21$), excelente saturação, matiz fiel e negligenciável metamerismo (0,01), aliados a excelente solidez de cor em testes de fricção (Grau 5) e lavagem a frio (Grau 5). Os objetivos da pesquisa foram plenamente atingidos, uma vez que as variáveis foram sistematicamente avaliadas, as condições ótimas identificadas e validadas, e seus efeitos nas propriedades de solidez confirmados, contribuindo significativamente para o aperfeiçoamento dos processos de tingimento reativo e redução do impacto ambiental através da minimização da hidrólise do corante.

Palavras-chave: tingimento reativo; otimização de processo; corantes bifuncionais

ABSTRACT

This work addresses the optimization of the reactive dyeing process of mercerized cotton with the bifunctional dye Corafix Red ME-4B 150%, a topic of significant relevance to the contemporary textile industry, considering the importance of improving colorimetric quality, color fastness, and environmental sustainability of dyeing processes. The objective was to identify the optimal operating conditions for the exhaust dyeing process by systematically investigating the influence of three critical variables — alkali type (sodium carbonate, sodium bicarbonate, and sodium hydroxide), temperature (20°C, 60°C, and 90°C), and processing time (20, 40, and 60 minutes) — on the colorimetric properties of dyed fibers. The methodology employed consisted of a factorial experimental design, in which cotton samples were subjected to the dyeing process under different combinations of the studied variables, followed by spectrophotometric color analysis using the CIELAB system to obtain parameters such as Delta E, saturation, hue, and metamerism, in addition to color fastness tests according to ISO 105-X12 (friction) and ISO 105-C06 (cold washing) standards. The results demonstrated that optimal dyeing conditions are achieved using sodium carbonate as the alkali, a temperature of 20°C, and a processing time of 60 minutes, conditions that provide imperceptible color difference ($\Delta E = 0.21$), excellent saturation, true hue, and negligible metamerism (0.01), combined with excellent color fastness in friction tests (Grade 5) and cold washing (Grade 5). The research objectives were fully achieved, since the variables were systematically evaluated, optimal conditions identified and validated, and their effects on fastness properties confirmed, contributing significantly to the improvement of reactive dyeing processes and reduction of environmental impact through the minimization of dye hydrolysis.

Keywords: reactive dyeing; process optimization; bifunctional dyes

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Camadas da parede celular com disposição helicoidal das microfibrilas na parede secundária.....	20
Figura 2: Representação esquemática das zonas cristalinas e das zonas amorfas nas cadeias de celulose.....	23
Figura 3: Mecanismos de ligação de corantes reativos à fibra celulósica: (a) formação de radical hidroxila em meio alcalino; (b) reação de substituição nucleofílica com anel azínico; (c) adição eletrofílica em meio alcalino.....	25
Figura 4: Ilustração que representa, de forma esquemática, o mecanismo de tingimento de corantes reativos em celulose.	37
Figura 5: influência no aspecto final da cor com os diferentes tipos de álcali usados nos testes	54
Figura 6: Comparação das amostras tingidas em diferentes temperaturas. O aumento da temperatura favorece a reatividade do corante, resultando em maior profundidade e uniformidade do tingimento.....	55
Figura 7: Influência do tempo de fixação no tingimento reativo. Tempos maiores (40 e 60 minutos) resultaram em maior intensidade e homogeneidade de cor em comparação aos 20 minutos.	56
Figura 8: leitura espectrofotométrica entre o álcali padrão X Carbonato de sódio	58
Figura 9: Leitura espectrofotométrica entre o álcali padrão X bicarbonato de sódio.....	59
Figura 10: leitura espectrofotométrica entre o álcali padrão X hidróxido de sódio	60
Figura 11: Leitura espectrofotométrica entre a temperatura padrão (60°C) X 20°C.....	69
Figura 12: Leitura espectrofotométrica entre a temperatura padrão (60°C) X 60°C	70
Figura 13: Leitura espectrofotométrica entre a temperatura padrão (60°C) X 90°C	71
Figura 14: Resultado da Leitura espectrofotométrica entre ao tempo de processo padrão X 20 minutos.....	82
Figura 15: Resultado da Leitura espectrofotométrica entre ao tempo de processo padrão X 40 minutos.....	83
Figura 16: resultado da Leitura espectrofotométrica entre ao tempo de processo padrão X 60 minutos.....	84
Figura 17: resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes tipos de álcalis.....	93

Figura 18: resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes temperaturas	96
Figura 19: resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes tempos de fixação	99
Figura 20: resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes tipos de álcalis.....	103
Figura 21: resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes temperaturas	104
Figura 22: resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes tempos de fixação.	106

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre os principais tipos de corantes reativos	35
Tabela 2: Equipamentos Utilizados no Estudo	50
Tabela 3: Produtos Químicos Utilizados no Estudo	51
Tabela 4: Ensaio: Álcalis — Barrilha (Na_2CO_3) (Receita Padrão para Comparativo).....	52
Tabela 5: Ensaio: Álcalis — Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3)	53
Tabela 6: Ensaio: Álcalis — Hidróxido de Sódio (NaOH).....	54
Tabela 7: Variação de Temperatura (mesma receita padrão variar apenas temperatura)	55
Tabela 8: Variação de Tempo (mesma receita e temperatura; variar somente o tempo) .	55
Tabela 9: resultados colorimétricos usando o carbonato de sódio como álcali do processo de tingimento	60
Tabela 10: resultados colorimétricos usando o bicarbonato de sódio como álcali do processo de tingimento	61
Tabela 11: resultados colorimétricos usando a soda como álcali do processo de tingimento	61
Tabela 12: Resultados colorimétricos do processo de tingimento à frio, 20°C	71
Tabela 13: Resultados colorimétricos do processo de tingimento à 60°C	71
Tabela 14: resultados colorimétricos do processo de tingimento à 90°C.....	72
Tabela 15: Resultados colorimétricos do processo de tingimento com 20 minutos de processo	84
Tabela 16: Resultados colorimétricos do processo de tingimento com 40 minutos de processo	84
Tabela 17: Resultados colorimétricos do processo de tingimento com 60 minutos de processo	85
Tabela 18: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.....	94
Tabela 19: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.....	97
Tabela 20: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.....	100
Tabela 21: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.....	104

Tabela 22: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.....	105
Tabela 23: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.....	106

SUMARIO

1INTRODUÇÃO	16
2REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
2.1 A FIBRA DE ALGODÃO COMO SUBSTRATO TÊXTIL	19
2.2 ESTRUTURA E MORFOLOGIA DA CELULOSE	22
2.3 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO ALGODÃO.....	24
2.3.1 Hidrofilicidade.....	24
2.3.2 COMPORTAMENTO DA CELULOSE EM MEIO ALCALINO	25
2.3.3 Fiação do Algodão	26
2.3.4 Tecelagem do Algodão.....	27
2.3.5 PRÉ-TRATAMENTO	28
3TINGIMENTO POR ESGOTAMENTO	30
3.1 Tingimento por esgotamento.....	30
3.2 Principais características.....	30
3.2.1 Afinidade corante-fibra.....	30
3.2.2 Parâmetros do processo que afetam o desempenho.....	30
4CORANTES REATIVOS: FUNDAMENTOS E MECANISMOS	32
4.1 Fundamentos dos Corantes Reativos.....	32
4.2 Estrutura Química e Grupos Reativos	32
4.3 Mecanismo de Fixação na Fibra Celulósica	33
4.4 Vantagens e Limitações	33
4.5 Importância no Tingimento do Algodão.....	34
4.6 Definição e Classificação dos Corantes Reativos	34
5MECANISMO DO TINGIMENTO.....	36
5.1 Reações simultâneas no banho de tingimento (equações simplificadas)	36
5.2 Porque as duas ocorrem ao mesmo tempo.....	37
5.3 Descrição cinética / relação qualitativa	37

5.4 Fatores que afetam k_fix e k_hyd	38
5.5 Estratégias práticas para maximizar fixação e minimizar hidrólise.....	39
5.6 Indicadores práticos de sucesso do tingimento.....	41
5.7 ETAPAS DO MECANISMO DE TINGIMENTO COM CORANTES REATIVOS	41
5.7.1 Adsorção inicial	41
5.7.2 Difusão interna	41
5.7.3 Ativação da fibra: formação de íon celulosato	41
5.7.4 Fixação covalente	42
5.7.5 Lavagem do corante não fixado	42
5.8 Aspectos cinéticos e termodinâmicos.....	42
5.9 Mecanismos reacionais específicos.....	42
60 SISTEMA DE CORES CIELAB E SEUS PARÂMETROS CONSTITUINTES..	44
7ESTUDO DE CASO: INFLUÊNCIA DO TEMPO, TIPO DE ÁLCALI E TEMPERATURA NA FIXAÇÃO DE CORANTES BIS-FUNCIONAIS EM ALGODÃO.....	48
7.1 Objetivo	48
7.2 Metodologia Experimental	48
7.2.1 Amostra	48
7.2.2 Equipamentos / produtos químicos	49
7.2.3 Receitas.....	52
7.2.4 Tipo de álcali	52
7.2.4.1 Teste com Carbonato de Sódio (Na_2CO_3)	52
7.2.4.2 Teste com Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3).....	53
7.2.4.3 Teste com Hidróxido de Sódio (NaOH).....	53
7.2.5 Teste com variação de temperatura (20°C, 60°C e 90°C).....	54
7.2.6 Teste com variação de tempo (20, 40 e 60 min).....	55
8RESULTADOS.....	57

8.1 Testes colorimétricos	57
8.1.1 Tingimento com diferentes tipos de álcali	57
8.1.1.1 Análise Detalhada por Parâmetro CIELAB.....	61
8.1.2 Tingimento com diferentes temperaturas.....	69
8.1.2.1 Análise Detalhada por Parâmetro CIELAB.....	72
8.1.3 Tingimento com diferentes tempos de fixação.....	82
8.1.3.1 Análise Específica por Parâmetro CIELAB.....	86
8.2 Testes de solidez	92
8.2.1 Ensaios de solidez a fricção	92
8.2.1.1 Tingimento com diferentes tipos de álcali.....	93
8.2.1.2 Tingimento com diferentes temperaturas	96
8.2.1.3 Tingimento com diferentes tempos de fixação	99
8.2.2 Ensaios de solidez a lavagem	103
8.2.2.1 Tingimento com diferentes tipos de álcali.....	103
8.2.2.2 Tingimento com diferentes temperaturas	104
8.2.2.3 Tingimento com diferentes tempos de fixação	105
8.3 Discussão Final - Análise Integrada Dos Resultados.....	107
9 CONCLUSÃO.....	111
REFERÊNCIAS	114

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil, um dos setores mais antigos e dinâmicos da economia global, enfrenta atualmente desafios significativos relacionados à sustentabilidade e à eficiência de seus processos produtivos. Dentre as diversas etapas que compõem a fabricação de produtos têxteis, o tingimento de fibras celulósicas, como o algodão, com corantes reativos, destaca-se pela sua importância e complexidade. Os corantes reativos são amplamente empregados devido à sua capacidade de formar ligações covalentes com a fibra, resultando em excelentes solidezes à lavagem e brilho de cor. Contudo, a eficiência desse processo é intrinsecamente ligada a uma série de parâmetros operacionais, cuja otimização é crucial para minimizar o desperdício de corante e o impacto ambiental. Neste contexto, a presente pesquisa se propõe a investigar a influência de variáveis específicas do processo de tingimento reativo, buscando aprimorar a eficiência de fixação do corante e, consequentemente, reduzir a hidrólise, um fenômeno indesejável que compromete a qualidade do tingimento e gera efluentes coloridos. A delimitação do tema foca, portanto, na otimização de parâmetros como o tipo de álcali, a temperatura e o tempo de processamento, visando uma fixação mais eficaz e sustentável dos corantes reativos em fibras de algodão.

Diante da complexidade e da necessidade de otimização desses processos, emerge a questão central que norteia este estudo: como os diferentes tipos de álcali (carbonato de sódio, bicarbonato de sódio e hidróxido de sódio), a temperatura de tingimento (20°C, 60°C e 90°C) e o tempo de processamento (20, 40 e 60 minutos) influenciam na eficiência de fixação e na qualidade colorimétrica de corantes reativos bi-funcionais em fibras de algodão?

A relevância desta investigação reside na sua capacidade de contribuir significativamente para a sustentabilidade da indústria têxtil. A otimização dos parâmetros de tingimento reativo não apenas resulta em uma redução do desperdício de corante, mas também promove a economia de recursos hídricos e minimiza o impacto ambiental associado ao descarte de efluentes. Compreender os mecanismos de fixação versus hidrólise dos corantes reativos é de suma importância tanto para a academia, ao aprofundar o conhecimento sobre a química e a engenharia dos processos têxteis, quanto para a prática industrial, ao fornecer subsídios para o desenvolvimento de processos mais eficientes e ecologicamente

corretos. A motivação para a escolha deste tema advém da crescente demanda por processos produtivos mais limpos e da necessidade de maximizar a utilização de recursos, alinhando a inovação tecnológica com a responsabilidade ambiental.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar comparativamente a influência do tipo de álcali, temperatura de tingimento e tempo de processamento na fixação eficiente de corantes reativos bi-funcionais em algodão Mercerizado, com vistas a otimizar a qualidade colorimétrica e minimizar a hidrólise do corante. Para alcançar este propósito, foram estabelecidos objetivos específicos: analisar o impacto de três tipos diferentes de álcali na qualidade colorimétrica e na fixação do corante reativo; investigar como diferentes temperaturas de tingimento afetam a eficiência de fixação e a degradação do corante; determinar o tempo ótimo de processamento que resulte em melhor fixação com qualidade de cor imperceptível; e comparar os resultados colorimétricos e de solidez através de análises quantitativas (ΔE , ΔC , ΔH e teste de metameria) e testes de solidez (fricção e lavagem a frio).

A metodologia empregada neste estudo adota uma abordagem experimental de estudo de caso, utilizando o corante reativo bi-funcional Corafix Vermelho ME-4B em algodão mercerizado como sistema modelo. A pesquisa envolve a realização de tingimentos em condições controladas, variando sistematicamente os três parâmetros investigados: tipo de álcali, temperatura e tempo de processamento. Após o tingimento, as amostras serão submetidas à avaliação colorimétrica quantitativa através do sistema CIELAB, com a determinação de ΔE , ΔC e ΔH , e à realização de testes de solidez, incluindo fricção a seco e úmido, e lavagem a frio. Os dados obtidos serão analisados comparativamente para identificar as condições ótimas de processo que resultem em melhor fixação do corante e qualidade de cor superior, fornecendo uma base sólida para as conclusões.

O trabalho organiza-se da seguinte forma: no primeiro capítulo apresenta-se uma revisão abrangente da literatura, abordando as propriedades fundamentais das fibras de algodão e celulose, os princípios do tingimento por esgotamento, a química e os mecanismos de fixação dos corantes reativos, a cinética simultânea de fixação e hidrólise, e o sistema de análise colorimétrica CIELAB. No segundo capítulo descrevem-se detalhadamente a metodologia experimental, os materiais utilizados, os procedimentos de tingimento e os protocolos de avaliação colorimétrica e de solidez. No terceiro capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos

para cada variável estudada (tipo de álcali, temperatura e tempo de processamento), com análise comparativa das diferenças colorimétricas, comportamento da solidez e implicações para a otimização do processo. Finalmente, nas conclusões sintetizam-se os principais achados, suas implicações práticas para a indústria têxtil e as perspectivas para trabalhos futuros nesta área.

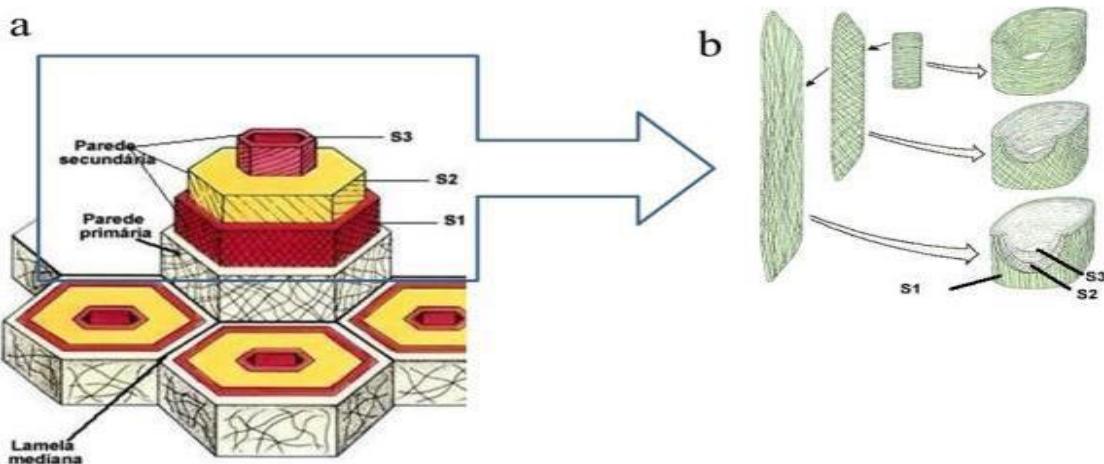
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 A FIBRA DE ALGODÃO COMO SUBSTRATO TÊXTIL

O algodão é a principal fibra natural de origem vegetal empregada na indústria têxtil, constituindo-se, essencialmente, de celulose. Em estado greige (cru), seu teor de celulose situa-se, de modo geral, entre 88% e 96% da massa seca; após os tratamentos de purga e alvejamento, a fração celulósica pode ultrapassar 99% (removendo-se impurezas de superfície), o que explica sua ampla aplicação como substrato para tingimento e acabamento. As frações não celulósicas—como ceras, pectinas, proteínas e cinzas—ocorrem em pequenas quantidades (tipicamente ~0,6% de ceras e 0,6–1,2% de pectinas), mas exercem papel relevante na molhabilidade e no comportamento ao tingimento antes da preparação (Guthrie, 1945, p. 15).

Do ponto de vista morfológico, a fibra individual de algodão é um tricoma unicelular que, quando madura e seca, exibe parede primária fina, parede secundária espessa organizada em microfibrilas celulósicas quase paralelas, e um lúmen central; ao colapsar no processo de secagem, forma as conhecidas convoluções ao longo do eixo longitudinal, importantes para a coesão entre fibras durante a fiação (Cotton Incorporated, 2013 p. 22). Essa organização em camadas, com microfibrílas em arranjo helicoidal (Figura 1) (por vezes com reversões de torção), está diretamente relacionada à resistência longitudinal e à resposta mecânica sob tração (Cotton Incorporated, 2013).

Figura 1: Camadas da parede celular com disposição helicoidal das microfibrilas na parede secundária.



Fonte: Adaptado de Castro (2015)

No plano químico e supramolecular, a celulose do algodão (predominantemente polimorfo I) contém abundantes grupos hidroxila ($-OH$) nas posições C2, C3 e C6, (Figura 2) responsáveis por intensa rede de ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares. Em termos de morfologia fina, coexistem domínios cristalinos e regiões amorfas; estas últimas são mais acessíveis à água e a reagentes e, portanto, cruciais à difusão de corantes e à formação de ligações (Cotton Incorporated, 2013 p. 25).

O regain de umidade do algodão sob condições padrão situa-se tipicamente entre 7% e 8,5%, podendo atingir cerca de 10,3% em algodão mercerizado; em umidades relativas muito altas (95–100% UR), a absorção pode chegar a 24–27% (Cotton Incorporated, 2013, p. 30; National Cotton Council, 2008, p. 10). Essa afinidade pela água favorece o intumescimento, com aumento de volume livre e mobilidade segmentar nas regiões menos ordenadas, efeito que impacta diretamente a difusão de eletrólitos e corantes na etapa de tingimento.

A preparação do substrato (desengomagem, purga e alvejamento) tem influência decisiva sobre a uniformidade de tingimento e a reproduzibilidade de cor. A literatura clássica mostra que as ceras cuticulares ($\approx 0,4\text{--}0,8\%$) dificultam a molhabilidade e a penetração de banho; a purga alcalina promove sua remoção por emulsificação/saponificação, reduzindo o teor de cera para faixas de 0,2–0,3% e

melhorando a capacidade da fibra de afundar rapidamente em água—um indicativo de molhabilidade e limpeza de superfície (Guthrie, 1945 p. 35). As pectinas localizam-se majoritariamente na parede primária e são sensíveis à extração por hidróxidos alcalinos; mesmo fervuras suaves em NaOH reduzem significativamente sua presença, mitigando problemas de manchas, variabilidade de tom e baixa exaustão em tingimentos subsequentes (Guthrie, 1945 p. 37).

Entre os tratamentos estruturais, destaca-se a mercerização (tipicamente com soluções ~20–25% de NaOH, com ou sem tensão), a qual incha a parede celular, reduz a cristalinidade relativa, aumenta a fração e a conectividade dos poros e expõe grupos hidroxila mais acessíveis. Como consequência, observa-se melhora consistente em exaustão e fixação de corantes, além de alterações benéficas em brilho, resistência e afinidade tintorial (Cotton Incorporated, 2013, p. 40; Kim et al., 2022, p. 50; Islam et al., 2008, p. 60).. Estudos recentes confirmam que a mercerização eleva a acessibilidade da fibra e é usualmente selecionada para aprimorar o desempenho do algodão em processos de tingimento—efeitos atribuídos ao aumento de porosidade efetiva e à maior disponibilidade de –OH reativos (Kim et al., 2022, p. 50).

Como substrato para sistemas reativos, o algodão oferece sítios nucleofílicos (–O–Cel) que, sob meio alcalino, geram alcóxidos de celulose (Cel–O–) capazes de reagir com grupos reativos de corantes (por exemplo, monoclorotriazina e vinilsulfona), formando ligações covalentes estáveis na parede celular. Embora o mecanismo detalhado pertença à discussão de corantes reativos, é relevante notar aqui que a química da celulose (acessibilidade, intumescimento, removibilidade de impurezas e modificação estrutural por mercerização) define a reatividade do substrato e, por consequência, a eficiência de fixação e a solidez úmida dos artigos tingidos (Cotton Incorporated, 2013, p. 45; Kim et al., 2022, p. 55).

Do ponto de vista físico-mecânico, fibras de algodão apresentam tenacidade a seco entre ~3,0–5,0 gf/den (com aumento de 10–20% quando úmidas), baixa resiliência (propensão a amarrotar) e elongação na ruptura ~3–10% (Cotton Incorporated, 2013, p. 45-46). Tais propriedades, combinadas ao diâmetro/finura

(refletidos pelo índice micronaire) e ao comprimento de mecha, impactam tanto o desempenho em fiação quanto a cinética de difusão em processos de tingimento por exaustão — micronaire mais baixo (fibras mais finas/menos maduras) pode reduzir o rendimento de cor aparente por maior espalhamento de luz, ainda que beneficie a resistência do fio (Cotton Incorporated, 2013, p. 46-47).

Em síntese, como substrato têxtil, o algodão combina: (i) química favorável à formação de ligações com corantes (abundância de $-OH$); (ii) morfologia e porosidade que podem ser ajustadas por preparo e Mercerização; (iii) higroscopичidade que promove intumescimento e facilita a difusão no banho; e (iv) estabilidade em meio alcalino, condição sob a qual se realizam tratamentos preparatórios e diversos processos de tingimento.

2.2 ESTRUTURA E MORFOLOGIA DA CELULOSE

A celulose é o principal componente químico da fibra de algodão, correspondendo a 88–96% da sua composição em estado cru e podendo ultrapassar 99% após a purificação e alvejamento (Guthrie, 1945, p. 12). Trata-se de um polissacarídeo linear formado pela repetição de unidades de β -D-glicose unidas por ligações β -(1→4)-glicosídicas, originando a unidade repetitiva denominada celobiose (Cotton Incorporated, 2013, p. 8). O alto peso molecular da celulose confere à fibra resistência mecânica, enquanto a presença de numerosos grupos hidroxila ($-OH$) define sua reatividade e interação com a água e com agentes químicos.

Na estrutura supramolecular da fibra, as cadeias de celulose organizam-se em duas regiões distintas: domínios cristalinos e regiões amorfas (Figura 2). Nos domínios cristalinos, as cadeias poliméricas estão fortemente empacotadas em arranjos paralelos, estabilizados por uma densa rede de ligações de hidrogênio intra e intermoleculares. Essa organização confere alta rigidez e baixa acessibilidade a moléculas externas, tornando os domínios cristalinos pouco permeáveis ao tingimento (Klemm et al., 2005, p. 26). Em contrapartida, as regiões amorfas apresentam cadeias menos ordenadas, com maior espaçamento intermolecular e

maior mobilidade, o que permite a penetração de moléculas de água, eletrólitos e corantes (Cotton Incorporated, 2013, p. 10).

É nessas regiões amorfas que o processo de tingimento do algodão ocorre predominantemente. A absorção de água promove intumescimento, aumentando o volume livre e facilitando a difusão de corantes até os grupos funcionais disponíveis (Islam; Rahman, 2008, p. 4206). Assim, a razão entre a fração cristalina e a fração amorfica da fibra tem impacto direto na cinética e na eficiência do tingimento.

Figura 2: Representação esquemática das zonas cristalinas e das zonas amorfas nas cadeias de celulose



Fonte: Nanoestruturas de Celulose: Aplicações Tecnológicas Emergentes - Revista Minerva Universitária

Do ponto de vista químico, os grupos hidroxila ($-OH$) presentes nas posições C2, C3 e C6 da anidroglicose são os principais sítios reativos da celulose. Em condições alcalinas, esses grupos podem ser deprotonados, originando alcóxidos de celulose ($Cel-O-$), que funcionam como nucleófilos. Essa característica é essencial para o mecanismo de fixação de corantes reativos, que se ligam covalentemente à fibra por meio da reação com esses grupos (Kim et al., 2022, p. 12).

Portanto, a estrutura hierárquica da celulose no algodão — da composição química básica até a organização em regiões cristalinas e amorfas —, associada à presença de grupos hidroxila acessíveis, explica tanto a resistência física da fibra quanto sua importância como substrato para o tingimento com corantes reativos.

2.3 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO ALGODÃO

O algodão é uma fibra natural composta predominantemente por celulose, cuja estrutura apresenta uma cristalinidade de aproximadamente 70 %, sendo o restante constituído por regiões amorfas que conferem elevada capacidade de absorção de água. As hidroxilas (-OH) livres na sua estrutura química aumentam sua afinidade com a água, explicando sua alta hidrofilicidade (Couteur; Burreson, 2006, P. 115; Pereira, 2009, p. 47). Essas propriedades influenciam diretamente a interação da fibra com corantes, auxiliares e solventes durante processos têxteis.

Além disso, o comportamento do algodão em ambientes alcalinos é fundamental em operações como a mercerização, etapa na qual a fibra é tratada com soluções de hidróxido de sódio (cerca de 20–30 %). Esse tratamento provoca o inchamento da celulose, melhora a afinidade por corantes e aumenta o brilho do tecido.

2.3.1 Hidrofilicidade

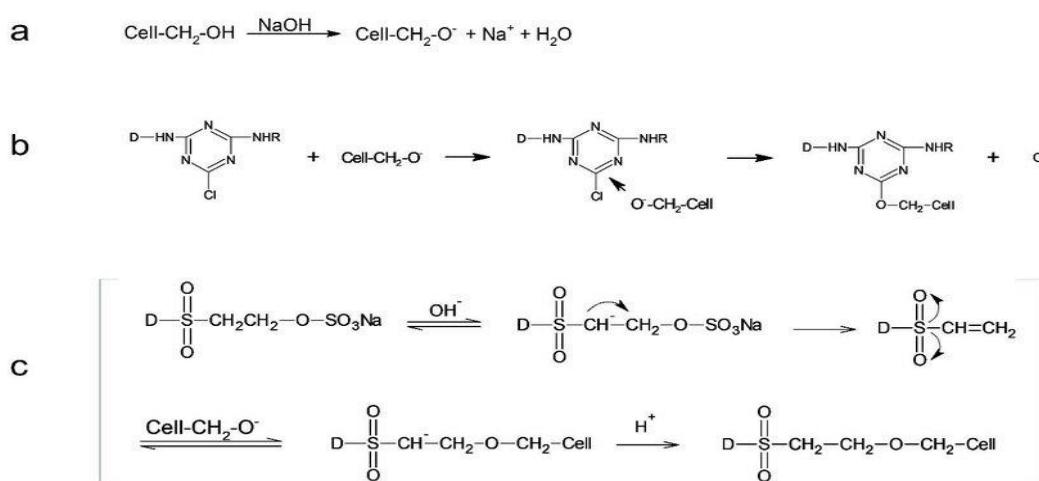
A hidrofilicidade do algodão está diretamente relacionada à sua composição química. A presença de grupos hidroxila (-OH) na molécula de celulose possibilita a formação de ligações de hidrogênio com moléculas de água, conferindo elevada capacidade de absorção (Pereira, 2009, p. 49). Essa característica é essencial para a etapa de tingimento, pois favorece a penetração das soluções corantes nas regiões amorfas da fibra (Couteur; Burreson, 2006, p. 118).

Por ser hidrofílico, o algodão apresenta excelente conforto ao uso, devido à capacidade de absorver umidade do ambiente e do corpo humano (Pereira, 2009, p. 52). Essa mesma propriedade, contudo, exige cuidados em processos industriais, já que influencia a taxa de secagem e a eficiência da aplicação de produtos químicos.

A hidrofilicidade do algodão refere-se à sua alta capacidade de absorção de água, propriedade diretamente ligada à presença de grupos hidroxila (-OH) na celulose (Figura 3), capazes de formar ligações de hidrogênio com moléculas de água (Pereira, 2009, p. 49; Couteur; Burreson, 2006, p. 118). Essa característica é

fundamental para o tingimento em meio aquoso, pois permite que o corante penetre eficientemente nas regiões amorfas da fibra, garantindo uma distribuição uniforme da cor e boa fixação química (Pereira, 2009, p. 52). Além disso, a hidrofilicidade confere ao algodão conforto ao uso, absorvendo a umidade do ambiente ou do corpo humano.

Figura 3: Mecanismos de ligação de corantes reativos à fibra celulósica: (a) formação de radical hidroxila em meio alcalino; (b) reação de substituição nucleofílica com anel azínico; (c) adição eletrofílica em meio alcalino.



Fonte: adaptado de “The mechanisms of reactive dye grafting onto fiber fabric” por Wenbo Wang et al., em A Prediction Model for Grafting Reactive Red 120 on Nanocellulose, 2018.

2.3.2 COMPORTAMENTO DA CELULOSE EM MEIO ALCALINO

Quando a celulose (cadeias de β -D-glicopiranose → ...) é exposta a ácalis, ocorrem três efeitos fundamentais que explicam por que o meio alcalino “ativa” a fibra para reagir com corantes reativos:

- Desprotonação dos grupos hidroxila → formação do íon celulosato ($\text{Cel}-\text{O}^-$). Em pH alcalino os grupos $-\text{OH}$ das unidades de glicose podem perder prótons, gerando espécies aniónicas ($\text{Cel}-\text{O}^-$) na superfície/exterior da fibrila. Essas espécies têm caráter nucleofílico e são os verdadeiros reagentes que atacam grupos eletrofílicos dos corantes reativos (por exemplo, anéis triazínicos ou intermediários vinilsulfona), formando ligações covalentes covalentes corante–fibra (Wang et al., 2016, p. 2175; EL SEoud et al., 2019, p. 4).

- Em termos práticos: a barrilha (Na_2CO_3) é utilizada industrialmente para elevar o pH do banho até a faixa necessária para que ocorra essa ativação (i.e., facilitar a formação de $\text{Cel}-\text{O}^-$ e neutralizar ácidos formados durante a reação). Documentos e trabalhos nacionais de processos de estampagem/tingimento registram o uso de carbonato de sódio como agente alcalinizante/fixador em formulações com corantes reativos (Raquel, 2017, p. 35–36).
- Inchaço e aumento da acessibilidade (alteração físico-estrutural). O meio alcalino rompe ligações de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares na estrutura da celulose, provocando inchaço (swelling) das microfibrilas e aumento do volume de interfibrilar ocupado por água. Esse inchaço aumenta a difusividade e a acessibilidade dos sítios reativos, facilitando a penetração do corante e a posterior difusão para o interior da fibra — fator crítico para eficiência de fixação em tingimento por esgotamento. Estudos experimentais com tratamentos alcalinos (NaOH ou sistemas NaOH/ureia) mostram diminuição da cristalinidade local e aumento da acessibilidade após tratamento alcalino, o que corrobora esse efeito. (Wang et al., 2016, p. 2176; EL Seoud et al., 2019, p. 5).

2.3.3 Fiação do Algodão

A fiação é o processo de transformação de fibras em fios contínuos, com propriedades adequadas para posterior tecelagem ou malharia. No caso do algodão, a qualidade do fio depende fortemente do comprimento, finura e maturidade das fibras, que influenciam a regularidade, resistência e uniformidade do produto final (Lord, 2003, p. 12-18).

As etapas fundamentais da fiação incluem abertura, limpeza, cardagem, estiragem, penteagem (quando aplicável) e torção. A abertura promove a separação dos flocos de algodão; a cardagem paraleliza as fibras e remove impurezas; a estiragem melhora a uniformidade do mecha; a penteagem, aplicada em algodões de fibras longas, elimina fibras curtas e aumenta a qualidade; por fim, a torção confere coesão ao fio (Ramaswamy; Kothari, 1999, p. 55-63).

Do ponto de vista físico-mecânico, fios de algodão apresentam boa resistência, alta regularidade quando obtidos a partir de fibras longas, mas tendem a gerar fios com certa pilosidade, devido à presença de fibras curtas. O índice micronaire (relação entre finura e maturidade) é crucial: fibras com micronaire baixo produzem fios mais resistentes, porém podem dificultar a uniformidade da cor no tingimento, devido ao maior espalhamento da luz (Cotton Incorporated, 2013, p. 43-45).

Na etapa de tingimento, a fiação exerce papel determinante. Fios mais regulares e compactos dificultam a difusão do corante, enquanto fios menos torcidos, de estrutura mais aberta, facilitam a penetração da solução corante. Assim, o controle da torção e da uniformidade do fio é essencial para assegurar reproduzibilidade e homogeneidade na coloração (SENAI CETIQT, 2014, p. 52-54).

2.3.4 Tecelagem do Algodão

A tecelagem consiste na interseção ortogonal de dois sistemas de fios — urdume e trama — para formação do tecido plano. Trata-se de uma das técnicas mais antigas e ainda predominante para a transformação de fios de algodão em artigos têxteis de ampla aplicação, desde vestuário até usos técnicos (Adanur, 2001, p. 73-75).

O processo inicia-se com o urdimento, onde os fios longitudinais são organizados paralelamente; em seguida, pode ocorrer a engomagem, que aplica substâncias protetoras ao urdume, aumentando a resistência ao atrito e reduzindo a quebra de fios durante a tecelagem; por fim, no tecimento, os fios de trama cruzam os fios de urdume de acordo com um ligamento preestabelecido (Kadolph, 2010, p. 122-125).

Os principais ligamentos utilizados são:

Tafetá: estrutura simples e firme, proporciona tecidos resistentes, mas de menor maleabilidade.

Sarja: confere diagonal característica, melhor caimento e resistência à abrasão.

Cetim: produz tecidos com maior brilho e suavidade, porém menos resistentes ao desgaste (Kadolph, 2010, p. 126-127).

No contexto do tingimento, a estrutura do tecido exerce influência decisiva. Tecidos de construção mais aberta permitem maior difusão e uniformidade do corante, enquanto tecidos densos e compactos apresentam maior barreira à penetração da solução, exigindo condições específicas de tempo, temperatura e agitação para garantir coloração homogênea (SENAI CETIQT, 2014, p. 98-101).

Assim, compreender as particularidades da tecelagem do algodão permite correlacionar a estrutura têxtil ao desempenho no tingimento, elemento fundamental no estudo de caso laboratorial deste trabalho.

2.3.5 PRÉ-TRATAMENTO

Antes de receber o tingimento, o algodão passa por etapas de pré-tratamento, cujo objetivo é eliminar impurezas naturais, como ceras, óleos, pectinas e pigmentos que prejudicam a uniformidade e a reproduzibilidade da cor .

As principais etapas incluem a desengomagem (remoção de amidos usados na tecelagem), a purga alcalina (remoção de ceras e gorduras) e o branqueamento (eliminação de pigmentos naturais para aumentar a alvura do tecido).

Pesquisas recentes apontam para o uso de métodos alternativos, como a purga enzimática com pectinases, que reduz o consumo de soda cáustica e minimiza impactos ambientais (Rosa, 2023, p. 56). Outro avanço é a utilização do ozônio no pré-alvejamento, técnica que auxilia na remoção de ceras e impurezas com menor consumo de água e produtos químicos (Maluf; Kolbe, 2003, p. 29).

Essas inovações reforçam a importância de adaptar os pré-tratamentos para atender não apenas à eficiência técnica, mas também à sustentabilidade ambiental, alinhando a produção têxtil às práticas de economia circular.

Antes de receber o corante, o algodão passa por pré-tratamentos que têm como objetivo limpar a fibra e prepará-la para uma coloração uniforme. Entre esses processos destacam-se:

Desengomagem, que remove pectinas, ceras e amidos aplicados durante a fiação ou tecelagem;

Purga ou cozimento, realizada em meio alcalino para eliminar gorduras e outras impurezas solúveis;

Alvejamento, que remove pigmentos naturais e aumenta a alvura do tecido.

Esses processos são essenciais para que a fibra apresente superfície limpa e homogênea, garantindo que o corante reativo se fixe de maneira uniforme, evitando manchas ou variações de cor. Pesquisas recentes indicam que métodos alternativos, como purga enzimática com pectinases ou alvejamento com ozônio, podem reduzir o impacto ambiental dos pré-tratamentos sem comprometer a eficiência (Rosa, 2023, p. 56; Maluf; Kolbe, 2003, p. 29).

3 TINGIMENTO POR ESGOTAMENTO

3.1 Tingimento por esgotamento

O tingimento por esgotamento (do inglês exhaust dyeing) é um processo de coloração descontínua em que o tecido ou a fibra permanece imerso em um banho contendo o corante, auxiliares, água e agentes alcalinizantes ou nível de pH controlado. O corante transfere-se do líquido para a fibra até que o banho esteja “esgotado”, ou seja, até que praticamente não haja mais corante livre no líquido que possa se fixar com eficiência na fibra. Esse método depende de mecanismos de adsorção inicial, difusão para o interior da fibra e, no caso de corantes reativos ou com grupos reativos, da fixação (por ligação covalente) entre o corante e a fibra (Reis; Revello, 2008, p. 1; Hossain et al., 2020, p. 127).

3.2 Principais características

3.2.1 Afinidade corante-fibra

A eficiência do esgotamento depende muito da afinidade do corante com a fibra. Corantes reativos, diretos ou ácidos (dependendo do tipo de fibra) alcançam bons resultados, pois possuem grupos químicos capazes de se ligar à fibra ou de penetrar nos espaços interfibrilares. Em fibras celulósicas (como algodão), os corantes reativos são muito usados porque podem formar ligação química covalente após ativação da fibra em meio alcalino (Hossain et al., 2020, p. 127-128).

3.2.2 Parâmetros do processo que afetam o desempenho

Diversos fatores influenciam o rendimento, uniformidade e solidez do tingimento por esgotamento:

Temperatura: Elevar a temperatura acelera a difusão molecular, favorece maior penetração do corante e pode aumentar o rendimento de esgotamento e fixação.

Porém, se muito alta, pode provocar degradação da fibra ou reações laterais indesejadas. Hossain et al. (2020, p. 130-131) mostraram que temperaturas entre ~60-70 ° C favoreceram esgotamento e força de cor (“color strength”) para algodão tingido com Reactive Red 195.

Tempo de tingimento: Tempo adequado é necessário para que ocorra difusão até o interior da fibra e que a reação de fixação (no caso de corantes reativos) prossiga. Tempos abaixo do ideal resultam em corante residual no banho, elevando o desperdício e afetando a uniformidade (Reis; Revello, 2008, p. 3).

Quantidade de eletrólitos (sal ou agentes que promovem esgotamento): Eletrólitos como sulfato de sódio ou cloreto ajudam a reduzir a repulsão entre moléculas de corante aniónico e a fibra, “forçando” o corante a sair do banho em direção à fibra. Em Hossain et al. (2020, p. 128), o aumento do sal melhorou o percentual de exaustão até um certo ponto ótimo (cerca de 40 g/L), acima do qual os ganhos foram menores.

pH / alcalinidade: Especialmente para corantes reativos, o pH elevado é necessário para ativar grupos nucleofílicos na fibra (por desprotonação de -OH, formando Cel-O⁻) e iniciar a reação de fixação. Hossain et al. (2020, p. 127-128) demonstram correlações positivas entre alcalinidade (uso de álcali /soda) e fixação do corante.

Relação banho : tecido (liquor ratio): Relações mais baixas favorecem esgotamento melhor, pois menos volume de banho implica menos corante “livre” para ocupar. Relações grandes podem diluir efeitos e exigir mais corante ou tempo. HOSSAIN et al. (2020, p. 129) verificaram que lavagem, fixação e força de cor diminuíram à medida que a relação liquor:goods aumentou.

4 CORANTES REATIVOS: FUNDAMENTOS E MECANISMOS

Os corantes reativos representam um dos avanços mais significativos na área da química têxtil, especialmente para o tingimento de fibras celulósicas, como o algodão. Introduzidos comercialmente na década de 1950 pela ICI (Imperial Chemical Industries), os corantes reativos foram os primeiros capazes de estabelecer ligações covalentes permanentes com a fibra, proporcionando alta solidez à lavagem e ampla gama de cores (Shore, 1995, p. 147-149).

4.1 Fundamentos dos Corantes Reativos

Diferentemente de outros grupos de corantes (diretos, enxofre, azo, etc.), os reativos possuem em sua estrutura um grupo cromóforo (responsável pela cor), grupos solubilizantes (geralmente sulfonatos, que conferem solubilidade em água) e, o mais importante, um grupo reativo capaz de reagir quimicamente com a fibra (Cardoso; Silva; Ferreira, 2019, p. 102-104).

O algodão, sendo composto majoritariamente por celulose, apresenta abundantes grupos hidroxila (-OH) em sua estrutura, o que o torna altamente adequado para a aplicação desse tipo de corante (Rajeshwaran et al., 2021, p. 7-9).

4.2 Estrutura Química e Grupos Reativos

Os grupos reativos mais comuns podem ser classificados em:

Halogenados: como as monoclorotriazinas (MCT) e diclorotriazinas (DCT), que reagem por substituição nucleofílica.

Vinilsulfônicos: derivados de sulfato de vinil, que reagem por adição nucleofílica em meio alcalino.

Bis-funcionais: apresentam dois grupos reativos distintos, conferindo maior fixação e solidez (PERKINS, 1996, p. 211-213).

Essas variações determinam as condições ótimas de aplicação: os corantes triazinicos, por exemplo, necessitam de temperaturas moderadas (30–60 °C),

enquanto os vinilsulfônicos exigem temperaturas mais altas (60–80 °C) para reatividade adequada (Trotto; Andrade; Souza, 2020, p. 85-87).

4.3 Mecanismo de Fixação na Fibra Celulósica

Em meio alcalino (geralmente com carbonato de sódio – barrilha), ocorre a ionização parcial das hidroxilas da celulose, formando o íon celulosato ($\text{Cel}-\text{O}^-$), que atua como nucleófilo. Esse íon ataca o átomo de carbono eletrofílico do grupo reativo do corante, formando uma ligação covalente estável:

Substituição nucleofílica: típica dos corantes com anel triaziníco halogenado.

Adição nucleofílica: comum nos vinilsulfônicos.

Esse processo garante alta solidez à lavagem, uma vez que o corante não está apenas adsorvido, mas quimicamente ligado à fibra (Paiva; Oliveira; Santos, 2018, p. 67-69). No entanto, parte do corante pode sofrer hidrólise competitiva (reação com a água), gerando moléculas não fixadas. Por isso, etapas posteriores de lavagem e saboaria são fundamentais para remover o excesso e garantir estabilidade de cor (Shore, 1995, p. 150-152).

4.4 Vantagens e Limitações

Os corantes reativos oferecem vantagens significativas:

Alta solidez à lavagem e ao suor;

Ampla variedade de cores brilhantes;

Versatilidade em processos de esgotamento, semi-contínuos e contínuos.

Por outro lado, apresentam desvantagens como:

Baixo rendimento econômico devido à perda por hidrólise;

Necessidade de grande volume de água e sal no processo;

Geração de efluentes coloridos e salinos, que exigem tratamento adequado (MACHADO; OLIVEIRA; VARGAS, 2017).

4.5 Importância no Tingimento do Algodão

Por ser a fibra natural mais consumida no mundo, o algodão é o principal substrato para os corantes reativos. Sua afinidade resulta de fatores estruturais (regiões amorfas e hidroxilas acessíveis), que permitem difusão adequada do corante e posterior reação covalente.

Assim, compreender os fundamentos e mecanismos dos corantes reativos é essencial para otimizar processos, reduzir desperdícios e melhorar o desempenho técnico e ambiental do tingimento.

4.6 Definição e Classificação dos Corantes Reativos

Os corantes reativos distinguem-se das demais classes por constituírem a única categoria de corantes capaz de formar ligações covalentes estáveis com as fibras têxteis, especialmente com substratos celulósicos como o algodão. Essa característica garante elevada solidez à lavagem e ao atrito, representando um marco na tecnologia de tingimento desde sua introdução pela ICI na década de 1950 (Cotton Incorporated, 2017, p. 4-5).

A estrutura química desses corantes apresenta três componentes básicos: o grupo cromóforo (responsável pela cor), grupos solubilizantes (normalmente radicais sulfônicos, que aumentam a solubilidade em água) e o grupo reativo, que possibilita a ligação covalente à fibra (Aysha et al., 2022, p. 3).

Classificação segundo o grupo reativo

A classificação mais comum dos corantes reativos é baseada no grupo funcional reativo presente em sua molécula (Tabela 1):

Tabela 1: Comparação entre os principais tipos de corantes reativos

Tipo de corante reativo	Grupo reativo	Mecanismo de reação	Temperatura de aplicação	Vantagens	Desvantagens
Monoclorotriazina (MTC)	Um atomo de cloro ligado ao anel triazínico	Substituição nucleofílica (-OH da celulose ataca o C do anel triazínico)	30-40°C	Fácil aplicação; economia de energia; ideal para tecidos sensíveis	Baixa taxa de fixação; menor solidez em lavagens repetidas
Diclorotriazina (DCT)	Dois atomos de cloro ligados ao anel triazínico	Substituição nucleofílica	40 - 60°C	Alta reatividade; melhor fixação que MCT	Alta taxa de hidrólise; menor estabilidade em estoque
Vinil sulfona (VS)	Grupo sulfato de vinil (ativa-se para vinilsulfona em meio alcalino)	Adição nucleofílica (-OH da celulose ataca a dupla ligação da vinilsulfona)	60 - 80°C	Boa solidez; fixação estável; adequada para tons médios a escuros	Exige temperaturas mais altas; maior consumo energético
Bifucionais (ex.:MCT/VS)	Dois grupos reativos diferentes (ex.:MTC + VS)	Reações combinadas (substituição + adição nucleofílica)	40 - 60°C	Elevada taxa de fixação; maior solidez; menor perda por hidrólise	Custo mais alto; formulação complexa

Fonte: Adaptado de Cotton Incorporated (2017, p. 4-6); Haque (2014, p. 5-6); Aysha et al. (2022, p. 3-4); Wang et al. (2018, p. 5-6).

Essa distinção é fundamental para a escolha do corante no processo de tingimento, pois a reatividade do grupo funcional está diretamente relacionada à temperatura ótima de aplicação e às condições do banho, impactando rendimento, fixação e estabilidade da cor (Haque, 2014, p. 5-6).

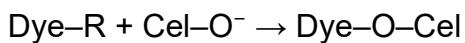
5 MECANISMO DO TINGIMENTO

O mecanismo do tingimento corresponde ao conjunto de fenômenos físico-químicos que ocorrem desde a dissolução do corante no banho até a fixação definitiva na fibra, passando por adsorção, difusão, ativação e reação covalente. No caso dos corantes reativos aplicados ao algodão, trata-se de um processo complexo que envolve tanto interações intermoleculares quanto ligações químicas estáveis (El Seoud; Guizzo; Oliveira, 2024, p. 2-4).

5.1 Reações simultâneas no banho de tingimento (equações simplificadas)

a) Reação de fixação (desejada)

Corante–Reativo + Fibra–OH (na forma Cel–O⁻) → Corante–O–Fibra (Ou, escrito de forma esquemática):



Aqui o íon celulosato (Cel–O⁻), gerado em meio alcalino, atua como nucleófilo e ataca o sítio eletrofílico do corante reativo, formando ligações covalentes estáveis corante–fibra. (Figura 4) (Cotton Incorporated, 2017, p. 4-5; Zhai et al., 2022, p. 31599-31601).

b) Reação de hidrólise (indesejada)

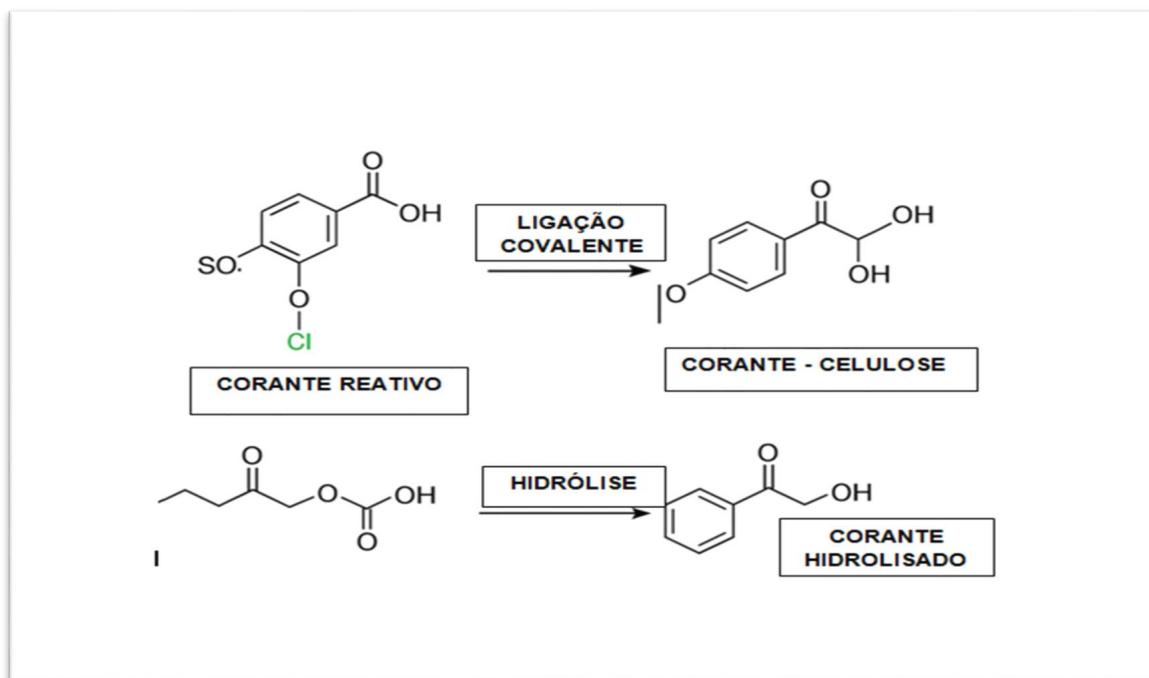
Corante–Reativo + H₂O (na presença de OH⁻) → Corante–OH
(corante hidrolisado, não fixável) + subprodutos

Esquematicamente:



Na hidrólise, a água (ou o ânion hidroxila, OH⁻, em banho alcalino) ataca o mesmo centro reativo do corante, convertendo-o numa forma hidrolisada que não pode formar ligação covalente com a celulose (Figura 4). Essa reação competitiva reduz a fração de corante disponível para fixação. (Haque, 2014, p. 5-6; El Seoud et al., 2019, p. 4-9).

Figura 4: Ilustração que representa, de forma esquemática, o mecanismo de tingimento de corantes reativos em celulose.



Fonte: Autora

5.2 Porque as duas ocorrem ao mesmo tempo

No banho de tingimento há simultaneamente:

- corante dissolvido em solução (susceptível à hidrólise),
- fibra cuja superfície / interior vai sendo ativado ($\text{Cel}-\text{O}^-$) em função do pH,
- e condições físicas (temperatura, tempo, sal, liquor ratio) que afetam as duas taxas.

Logo, a fixação e a hidrólise concorrem pelo mesmo grupo reativo do corante.

A fração do corante que efetivamente fixa depende das velocidades relativas dessas reações.

5.3 Descrição cinética / relação qualitativa

Se chamarmos k_{fix} a constante de velocidade efetiva da fixação ($\text{Dye} + \text{Cel}-\text{O}^- \rightarrow \text{Dye}-\text{O}-\text{Cel}$) e k_{hyd} a constante de velocidade da hidrólise ($\text{Dye} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Dye}-\text{OH}$), e assumirmos que ambas seguem cinética de primeira ordem em relação ao

corante sob condições do banho, a fração de corante fixado (η) pode ser aproximada por:

$$\eta \approx \frac{k_{fix}}{k_{fix} + k_{hyd}}$$

Isto mostra, de forma direta, que quanto maior for k_{fix} em relação a k_{hyd} , maior será o rendimento de fixação. Assim, estratégias de processo visam aumentar k_{fix} e/ou reduzir k_{hyd} . (Zhai et al., 2022, p. 31600-31603; El Seoud et al., 2019, p. 4-6).

5.4 Fatores que afetam k_{fix} e k_{hyd}

- **pH / alcalinidade**

Aumenta k_{fix} ao elevar a concentração de CeI-O^- (necessária para a fixação). Entretanto, pH muito alto também aumenta k_{hyd} , porque o OH^- promove hidrólise do corante. Portanto busca-se alcalinidade moderada/otimizada (adição controlada de barrilha ou NaOH). (Cotton Incorporated, 2017, p. 4-5; Haque, 2014, p. 5-6).

- **Temperatura**

Eleva mobilidade molecular e velocidade de reação: aumenta tanto k_{fix} quanto k_{hyd} . Há, portanto, uma temperatura ótima para cada corante (por ex., MCT “a frio” vs VS “a quente”). Ultrapassar a faixa aumenta perdas por hidrólise. (Wang et al., 2018, p. 6-7; Zhai et al., 2022, p. 31602-31603).

- **Tempo de exposição**

Tempo maior dá oportunidade para fixação, mas também para hidrólise. Novamente, existe um ponto ótimo de tempo onde η é máximo. (El Seoud et al., 2019, p. 5-7).

- **Natureza do grupo reativo**

Grupos mais reativos (ex.: DCT) têm k_{fix} elevado mas também tipicamente k_{hyd} maior; grupos menos reativos (MCT “a frio”) têm hidrólise menor, mas

podem ter k_{fix} menor. Corantes bifuncionais (ex.: MCT/VS) combinam vantagens e costumam melhorar η . (Haque, 2014, p. 5-6; Aysha et al., 2022, p. 3-4).

- **Liquor ratio (relação banho:tecido)**

Relações baixas favorecem esgotamento (menos corante livre no banho), aumentando a chance de contato fibra-corante e, portanto, k_{fix} aparente; relações altas diluem corante e podem favorecer hidrólise relativa. (Hossain et al., 2020, p. 128-129).

- **Presença de eletrólitos (sal)**

Sais promovem adsorção inicial do corante aniónico na fibra, favorecendo que o corante esteja próximo ao sítio reativo quando a alcalinização ocorrer — isto aumenta efetivamente k_{fix} competitivo frente a k_{hyd} . Métodos “salt-free” tentam alternativas que reduzam impacto ambiental, mas requerem ajustes para não reduzir η . (Aysha et al., 2022, p. 3-4; Hossain et al., 2020, p. 128).

5.5 Estratégias práticas para maximizar fixação e minimizar hidrólise

A partir dos princípios acima, práticas industriais e laboratoriais bem estabelecidas incluem:

- a. **Separar adsorção da alcalinização (timing control)**

Primeiro favorecer adsorção do corante na fibra (com sal e temperatura moderada) e só depois alcalinizar para gerar Cel-O⁻. Assim, o corante está já próximo ao sítio reativo quando a base é adicionada, aumentando k_{fix} relativo a k_{hyd} . (Cotton Incorporated, 2017, p. 4-5; Hossain et al., 2020, p. 128).

- b. **Adicionar alcalino de forma controlada (dose/forma)**

Uso de carbonato (barrilha) ou dosagens graduais de NaOH, ou sistemas tamponados, para evitar picos de OH⁻ que aceleram hidrólise. Pad-batch e

técnicas de padding aplicam o alcalino localmente para reduzir exposição do corante livre. (Haque, 2014, p. 5-6).

c. Escolha adequada do tipo de corante

Para peças sensíveis à temperatura, escolher corantes “a frio” (MCT) para reduzir hidrólise. Para necessidades de alta solidez em tons escuros, optar por bifuncionais ou combinações que aumentem probabilidade de ligação antes da hidrólise. (Aysha et al., 2022, p. 3-4; Zhai et al., 2022, p. 31600).

d. Otimizar temperatura e tempo

Trabalhar na faixa térmica que maximize difusão e reação sem acelerar excessivamente a hidrólise. Muitas formulações têm um ‘perfil de aquecimento’ (rampa controlada) para equilibrar esses efeitos. (Wang et al., 2018, p. 6-7).

e. Reduzir liquor ratio quando possível

Relações banho:tecido menores aumentam a probabilidade de fixação e reduzem corante livre sujeito à hidrólise. (HOSSAIN et al., 2020, p. 128-129).

f. Uso de coadjuvantes e pré-tratamentos

Pré-tratamentos (desengomagem, mercerização) aumentam acessibilidade; agentes nivelantes e penetrantes controlam a distribuição e ajudam na adsorção inicial. Alguns tratamentos catiônicos superficiais podem aumentar afinidade por corantes aniônicos, favorecendo fixação. (Zhai et al., 2022, p. 31599-31601).

g. Emprego de métodos alternativos / tecnológicas

Corantes e processos “salt/alkali-free”, uso de solventes alternativos ou meios óleo-base, e tecnologias de micro-ondas ou ultrassom têm sido testados para reduzir hidrólise e consumo de água/químicos. Estes aparecem na literatura recente como estratégias promissoras, mas exigem validação para aplicações industriais. (Aysha et al., 2022, p. 3-4; Locks et al., 2025, p. 3-5).

5.6 Indicadores práticos de sucesso do tingimento

- Percentual de fixação (fixation yield) — fração do corante que fica ligado covalentemente após lavagem. Quanto maior, melhor.
- K/S (intensidade de cor) antes e depois da lavagem — diferença grande indica alta perda de cor por não-fixação.
- Solidez à lavagem e suor — diretamente relacionada à fração de corante covalentemente ligado. (El Seoud et al., 2024, p. 5-7; Zhai et al., 2022, p. 31602-31603).

5.7 ETAPAS DO MECANISMO DE TINGIMENTO COM CORANTES REATIVOS

5.7.1 Adsorção inicial

O primeiro passo consiste na adsorção física do corante na superfície da fibra. Nessa fase, predominam interações como forças de van der Waals, ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas, as quais são favorecidas pela adição de eletrólitos (NaCl ou Na_2SO_4), que reduzem a repulsão entre a fibra carregada negativamente e o corante aniônico (Zhai et al., 2022, p. 31597-31599).

5.7.2 Difusão interna

Após a adsorção superficial, o corante migra para o interior da fibra, especialmente para as regiões amorfas da celulose. O meio alcalino contribui para o inchaço da fibra, quebrando ligações de hidrogênio internas e aumentando a acessibilidade da estrutura celulósica (El Seoud; Guizzo; Oliveira, 2024, p. 3-5).

5.7.3 Ativação da fibra: formação de íon celulosato

Sob condições alcalinas, os grupos hidroxila ($-\text{OH}$) da celulose são desprotonados, originando o ânion $\text{Cel}-\text{O}^-$, que atua como verdadeiro agente nucleofílico. Esse processo é essencial para que ocorra a reação covalente com o grupo reativo do corante (Locks et al., 2025, p. 3-5).

5.7.4 Fixação covalente

A fixação se dá por reações distintas, dependendo do grupo reativo do corante:

Substituição nucleofílica: típica de corantes clorotriazínicos, em que o átomo de cloro é substituído pelo oxigênio do Cel–O⁻.

Adição nucleofílica: comum nos corantes vinilsulfônicos, cujo grupo vinilsulfona, ativado em meio alcalino, é atacado pelo Cel–O⁻ (Zhai et al., 2022, p. 31599-31601).

5.7.5 Lavagem do corante não fixado

Mesmo após a reação covalente, parte do corante não reage devido à hidrólise competitiva em meio alcalino. Por isso, etapas subsequentes de lavagem intensiva são indispensáveis para remover moléculas hidrolisadas ou apenas fisicamente adsorvidas, garantindo solidez adequada (Locks et al., 2025, p. 4-6).

5.8 Aspectos cinéticos e termodinâmicos

O tingimento reativo é regido por fatores de natureza cinética (taxa de difusão e velocidade da reação de fixação) e termodinâmica (equilíbrio de adsorção). Estudos recentes apontam que a cinética do tingimento de misturas algodão-PET com corantes reativos pode ser descrita por modelos de pseudo-segunda ordem, evidenciando que tanto a difusão quanto a reação química influenciam a taxa global do processo (El Seoud; Guizzo; Oliveira, 2024, p. 5-7).

Do ponto de vista termodinâmico, a elevação da temperatura aumenta a mobilidade molecular e a concentração de Cel–O⁻, favorecendo a fixação. Entretanto, valores excessivos de temperatura e pH intensificam a hidrólise do corante, reduzindo o rendimento global (Zhai et al., 2022, p. 31602-31603).

5.9 Mecanismos reacionais específicos

A literatura descreve dois mecanismos principais:

Substituição nucleofílica em corantes do tipo monoclorotriazina (MCT) e diclorotriazina (DCT);

Adição nucleofílica em corantes vinilsulfônicos (VS).

Além disso, corantes bifuncionais, contendo dois grupos reativos distintos, podem reagir por ambos os mecanismos, apresentando maior taxa de fixação e melhor solidez (Cellulose, 2024, p. 7-8; Acs Omega, 2019, p. 3-4).

O mecanismo de tingimento com corantes reativos no algodão é caracterizado por uma sequência de etapas interdependentes: adsorção, difusão, ativação, reação covalente e lavagem. O controle rigoroso de variáveis como pH, temperatura, concentração de sais e tempo é essencial para maximizar a eficiência do processo e reduzir perdas por hidrólise. Avanços recentes, como o uso de corantes bifuncionais e métodos alternativos de aplicação, visam otimizar rendimento e sustentabilidade do tingimento reativo.

6 O SISTEMA DE CORES CIELAB E SEUS PARÂMETROS CONSTITUINTES

O espaço de cor CIELAB, também referido como CIE Lab*, é um modelo cromático perceptual uniforme, normatizado pela Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) em 1976 (CIE, 1976). Sua concepção teve como objetivo primário a descrição abrangente de todas as cores perceptíveis ao olho humano, de forma independente do dispositivo de exibição ou do meio em que são apresentadas (KANG; YANG, 2006). A principal vantagem deste modelo reside em sua notável uniformidade perceptiva, o que implica que variações numéricas idênticas entre dois pontos dentro do espaço CIELAB correspondem a diferenças de cor igualmente percebidas por um observador (SHARMA et al., 2005). Essa característica o estabelece como uma ferramenta indispensável em contextos em que a acurácia cromática é de suma importância, incluindo aplicações em controle de qualidade, ciências biomédicas, indústria têxtil, sistemas gráficos e de visão computacional (HUNT et al., 2005).

O CIELAB é fundamentado em um sistema de coordenadas tridimensional, definido por três eixos ortogonais primários: L*, a* e b* (CIE, 1976).

- Eixo L (Luminosidade):* Este eixo quantifica a luminosidade ou clareza de uma cor, abrangendo um intervalo de 0 a 100 (CIE, 1976). Um valor $L^* = 0$ representa o preto absoluto, enquanto $L^* = 100$ corresponde ao branco difuso de maior brilho. Valores intermediários expressam graduações de cinza ou a intensidade luminosa inerente a uma determinada coloração (SHARMA et al., 2005). A elevação dos valores de L^* indica uma maior clareza visual.
- Eixo a (Componente Vermelho-Verde):* Este eixo bivalente representa a componente de cromaticidade que oscila entre o verde e o vermelho (CIE, 1976). Coordenadas a* negativas denotam cores que se aproximam do verde, ao passo que valores a* positivos indicam tonalidades na faixa do vermelho. O ponto $a^* = 0$ significa um cinza neutro, caracterizando a ausência de componentes verdes ou vermelhos. O intervalo teórico para a* é de aproximadamente -128 a +127, embora os valores práticos para cores reais sejam ligeiramente mais restritos (HUNT et al., 2005).

- Eixo b (Componente Amarelo-Azul):* Similar ao eixo a*, o eixo b* é bivalente e representa a componente de cromaticidade que varia do azul ao amarelo (CIE, 1976). Valores b* negativos correspondem a cores na gama do azul, enquanto valores b* positivos indicam tonalidades na gama do amarelo. O ponto b* = 0 denota um cinza neutro, sem componentes azuis ou amarelos. A faixa teórica para b* também se estende de aproximadamente -128 a +127, com variações práticas análogas às observadas no eixo a*.

Adicionalmente aos eixos L*, a* e b*, outras duas propriedades cruciais para a descrição da qualidade cromática de uma cor podem ser matematicamente derivadas das coordenadas a* e b*: croma (C*) e matiz (h) (SHARMA et al., 2005).

- C (Croma/Saturação):* O croma expressa a saturação ou a pureza de uma cor, indicando seu grau de vivacidade ou “colorido” (HUNT et al., 2005). É computado como a distância do ponto de cor ao eixo L* no plano ab. Matematicamente, C* é a magnitude do vetor no plano ab, calculada pela expressão: $C*=\sqrt{(a*)^2 + (b*)^2}$ (SHARMA et al., 2005). Valores de C* próximos de zero indicam cores de menor saturação ou mais acinzentadas, enquanto valores elevados denotam cores mais saturadas e vibrantes. O intervalo de C* varia de 0 a aproximadamente 180 (dependendo dos valores máximos de a* e b*).
- h (Matiz): O matiz descreve a tonalidade predominante de uma cor, ou seja, se ela é predominantemente vermelha, amarela, verde, azul, ou uma combinação (CIE, 1976). É expresso como um ângulo em graus no plano ab do sistema CIELAB. O ângulo de matiz é calculado pela fórmula: $h = \arctan(b*/a*)$ (HUNT et al., 2005). O valor de h varia de 0° a 360°, onde 0°/360° correspondem ao vermelho (+a*), 90° ao amarelo (+b*), 180° ao verde (-a*) e 270° ao azul (-b*). O matiz é fundamental para a classificação da “família” de uma cor.

A métrica Delta E (ΔE), também conhecida como diferença de cor, é de relevância fundamental no sistema CIELAB, pois quantifica a divergência perceptível entre

duas colorações no espaço tridimensional Lab* (SHARMA et al., 2005). É determinada como a distância euclidiana entre dois pontos nesse espaço, representando a magnitude da diferença global entre as duas cores.

A formulação mais elementar e historicamente primária é a CIELAB Delta E 1976 (ΔE^{*ab}), que consiste simplesmente na distância euclidiana entre as coordenadas Lab de duas cores (CIE, 1976):

$$\Delta E^{*ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Onde:

$$\Delta L^* = L_2^* - L_1^* \text{ (diferença na luminosidade)}$$

$$\Delta a^* = a_2^* - a_1^* \text{ (diferença no eixo vermelho-verde)}$$

$$\Delta b^* = b_2^* - b_1^* \text{ (diferença no eixo amarelo-azul)}$$

Embora esta fórmula seja intuitiva por tratar o espaço CIELAB como um sistema cartesiano para o cálculo da distância direta, o ΔE^{*ab} de 1976 apresentava inconsistências em diversas regiões do espaço de cor (LISSNER; PREISS, 2008). Isso significa que uma mesma diferença numérica nem sempre se correlacionava com uma diferença perceptiva idêntica para o olho humano.

Diante dessa limitação, foram desenvolvidas formulações mais avançadas para o cálculo do Delta E, tais como o CIELAB Delta E 1994 ($\Delta E94$) e, mais recentemente, o CIEDE2000 ($\Delta E00$) (SHARMA et al., 2005; LISSNER; PREISS, 2008). Essas versões aprimoradas incorporam fatores de ponderação e transformações paramétricas com o intuito de otimizar a correlação entre a diferença numérica e a percepção humana, particularmente em áreas de cores saturadas ou escuras, onde a sensibilidade visual humana a pequenas variações é acentuada.

O Delta E00 ($\Delta E00$) foi concebido para mitigar os problemas de uniformidade perceptiva inerentes ao $\Delta E94$ (SHARMA et al., 2005). Ele é refinado por meio de cinco correções distintas: uma função de ponderação para luminosidade ($k_{L,SL}$),

uma função de ponderação para croma (k_{CSC}), uma função de ponderação para matiz (k_{HSH}), um termo interativo entre as diferenças de croma e matiz para núcleos azuis, e um fator de escala para o eixo a^* do CIELAB para diferenças em núcleos quase neutros (LISSNER; PREISS, 2008). A fórmula do $\Delta E00$ é expressa de forma complexa, incorporando essas múltiplas ponderações para melhor representar a percepção humana de diferenças cromáticas.

A compreensão aprofundada desses componentes e suas inter-relações é fundamental para a análise e comunicação precisas das cores. Tal conhecimento facilita a detecção de pequenas variações cromáticas e assegura a consistência em uma vasta gama de processos e aplicações científicas e industriais (HUNT et al., 2005).

7 ESTUDO DE CASO: INFLUÊNCIA DO TEMPO, TIPO DE ÁLCALI E TEMPERATURA NA FIXAÇÃO DE CORANTES BIS-FUNCIONAIS EM ALGODÃO

O controle das variáveis de processo no tingimento com corantes reativos é fundamental para a obtenção de cores intensas, uniformes e com elevada solidez. Entre os diferentes tipos de corantes reativos disponíveis, os bis-funcionais têm se destacado por apresentarem duas funções reativas independentes, o que permite uma fixação mais eficiente e estável à fibra celulósica (Shore, 1995, p. 221).

O Corafix Vermelho ME4B, pertencente à classe dos bis-fucionais vinilsulfônico-triazinícos, combina dois tipos de grupos reativos: o vinilsulfônico, que reage por adição nucleofílica em meio alcalino, e o monoclorotriazínico, que reage por substituição nucleofílica. Essa combinação confere ao corante maior versatilidade e resistência à hidrólise, resultando em melhor rendimento e solidez à lavagem.

Este estudo de caso tem como objetivo analisar como tempo, tipo de álcali e temperatura influenciam a fixação do Corafix Vermelho ME-4B 150% em tecidos de algodão mercerizado, considerando o equilíbrio entre reações desejadas de fixação e reações competitivas de hidrólise.

7.1 Objetivo

Avaliar a influência do tempo de tingimento, tipo de álcali e temperatura sobre a eficiência de fixação do corante Corafix Vermelho ME-4B 150% em tecido de algodão, determinando as condições que maximizam a reação de fixação e minimizam a hidrólise do corante.

7.2 Metodologia Experimental

7.2.1 Amostra

As amostras utilizadas nos ensaios corresponderam a um tecido plano com construção em tela (taffetá), composto exclusivamente por fibra de algodão.

Inicialmente, o tecido foi submetido ao purgamento, etapa destinada à remoção de ceras naturais, óleos, impurezas e resíduos provenientes da fiação e tecelagem. Em seguida, realizou-se o alvejamento, visando promover maior alvura, uniformidade e aumento da hidrofilidade da fibra, otimizando assim a penetração e fixação do corante reativo. Após o tratamento químico, as amostras foram secas em estufa, assegurando condições estáveis de umidade antes da etapa de tingimento.

Figura 5 – Amostra utilizada para todos os testes



Fonte: Autora

7.2.2 Equipamentos / produtos químicos

Descrição dos equipamentos Utilizados

Para a realização dos ensaios de tingimento reativo, foram utilizados equipamentos essenciais para garantir precisão, repetibilidade e controle das condições experimentais (Tabela 2). Esses instrumentos possibilitaram desde a medição exata dos reagentes até o processamento térmico do tecido durante o tingimento. A combinação entre equipamentos de laboratório e a máquina de tingimento HT permitiu conduzir o processo com segurança, eficiência e confiabilidade nos resultados (Figura 6).

Tabela 2: Equipamentos Utilizados no Estudo

Equipamento	Descrição Técnica	Função no Processo
Máquina de Tingimento HT Mathis	Equipamento de alta temperatura (HT) com controle digital de aquecimento, agitação e ciclos programáveis.	Realizar tingimentos com repetibilidade e controle preciso de temperatura, tempo e movimento.
Balança Analítica de Precisão	Precisão de 0,0001 g, utilizada para pesagem exata de corantes, álcalis e amostras.	Garantir exatidão na concentração do corante (1% o.m.f.) e dos auxiliares.
Beckers de Vidro Borossilicato (50–250 mL)	Resistentes ao calor e agentes químicos; utilizados em preparo e manipulação de soluções.	Preparar banhos, dissolver corantes e misturar reagentes.
Pipetas Volumétricas e Automáticas	Alta precisão para volumes reduzidos; usadas para medir auxiliares líquidos.	Garantir volumes exatos dos reagentes que compõem o banho total de 60 mL.
Provetas Graduadas	Vidrarias com graduação visível para medir volumes maiores de líquidos.	Medição de água e soluções para completar o volume total do banho e manter a relação 1:12.

Fonte: autora

Figura 6 – Máquina HT Mathis



Fonte: Autora

Descrição dos Produtos Químicos Utilizados

Os reagentes utilizados nos processos de tingimento e pós-tratamento foram selecionados de acordo com sua função específica no mecanismo de fixação dos corantes reativos e no preparo adequado do substrato têxtil. A tabela 3 descreve os produtos empregados nos ensaios:

Tabela 3: Produtos Químicos Utilizados no Estudo

Produto Químico	Função / Aplicação	Descrição Técnica
Corante Reativo Corafix Vermelho ME-4B 150%	Agente de coloração	Corante reativo bi-funcional, alta reatividade, forma ligações covalentes com a celulose; aplicado a 1% o.m.f.
Carbonato de Sódio (Na_2CO_3) – Barrilha	Alcalinizante principal	Álcali moderado; promove formação do íon celulosato ($\text{Cel}-\text{O}^-$); apresentou melhor desempenho de fixação.
Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3)	Alcalinizante suave	Álcali fraco; gera pH mais baixo e menor eficiência de fixação nos testes comparativos.
Hidróxido de Sódio (NaOH)	Alcalinizante forte	Eleva rapidamente o pH; promove alta reatividade, porém aumenta a hidrólise do corante, reduzindo o rendimento de cor.
Sal (NaCl)	Eletrólito para esgotamento	Facilita a migração inicial do corante da solução para a fibra; reduz solubilidade do corante no banho.
Detergente (para saboaria)	Remoção de corante hidrolisado	Tensoativo utilizado após o tingimento; remove corante não fixado, melhora solidez e estabilidade de cor.
COLORSPERSE STP CONC.	Sequestrante e dispersante	Complexa Ca^{2+} e Mg^{2+} ; evita incrustações e dureza da água; estabiliza o processo e protege o tecido.
Banho Antiquebradura	Proteção mecânica do tecido	Auxiliar que reduz tensão e atrito durante o tingimento; previne quebras de fibras e melhora a uniformidade.

Fonte: Autora

7.2.3 Receitas

Para garantir a reproduzibilidade dos ensaios e permitir a análise comparativa entre as variáveis estudadas, foram elaboradas receitas específicas de tingimento, ajustadas conforme os objetivos de cada teste. As formulações seguiram um padrão-base, variando apenas nos parâmetros avaliados — tipo de álcali, temperatura do processo e tempo de permanência do tecido na fase de fixação.

As receitas apresentadas a seguir descrevem, de forma detalhada, as quantidades de cada insumo utilizado, assim como as condições operacionais empregadas na máquina de tingimento HT Mathis. Essas informações são fundamentais para compreender a influência de cada variável sobre o comportamento do corante reativo Corafix Vermelho ME-4B 150% na fibra de algodão, possibilitando posteriormente a discussão dos resultados de fixação, solidez e leitura espectrofotométrica.

7.2.4 Tipo de álcali

7.2.4.1 Teste com Carbonato de Sódio (Na_2CO_3)

A receita de tingimento contendo carbonato de sódio (Na_2CO_3) foi elaborada para avaliar o desempenho do corante reativo sob um álcali de média alcalinidade, amplamente utilizado na indústria têxtil. Esse ensaio buscou verificar como o carbonato influencia a fixação, a intensidade de cor e a uniformidade do tingimento em amostras de algodão. A tabela 4 apresenta a composição completa do banho e suas quantidades ajustadas para a amostra de 5 g com relação de banho 1:12. Este álcali foi usado como padrão para os testes que serão apresentados na seção resultados.

Tabela 4: Ensaio: Ácalis — Barrilha (Na_2CO_3) (Receita Padrão para Comparativo)

Item	Concentração/Nota	Quantidade (60 mL)
Amostra	—	5,0 g
Relação de Banho	1:12	60 mL
Solução de corante (1:200)	1% o.m.f.	10,0 mL
Sal	60 g/L	3,60 g
Barrilha (Na_2CO_3)	10 g/L	0,60 g
Sequestrante	2 g/L	0,12 g
Água	—	completar 60 mL

- Observações: Máquina HT Mathis; temperatura padrão 60°C; 40 minutos; pós-lavagem e ensaboamento; testes: solidez fricção/lavagem e espectrofotometria

7.2.4.2 Teste com Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3)

O ensaio utilizando bicarbonato de sódio (NaHCO_3) teve como objetivo analisar o comportamento do corante reativo em condições de alcalinidade moderada e progressiva, típica de processos mais suaves. Esse teste permite observar a influência do bicarbonato na velocidade de reação, no grau de esgotamento do corante e na intensidade final da cor. A tabela 5 apresenta todos os componentes do banho ajustados para a amostra de 5 g.

Tabela 5: Ensaio: Ácalis — Bicarbonato de Sódio (NaHCO_3)

Item	Concentração/Nota	Quantidade (60 mL)
Amostra	—	5,0 g
Relação de Banho	1:12	60 mL
Solução de corante(1:200)	1% o.m.f.	10,0 mL
Sal	60 g/L	3,60 g
Bicarbonato (NaHCO_3)	10 g/L	0,60 g
Sequestrante	2 g/L	0,12 g
Água	—	completar 60 mL

- Observações: Máquina HT Mathis; temperatura padrão 60°C; 40 minutos; pós-lavagem e ensaboamento; testes: solidez fricção/lavagem e espectrofotometria

7.2.4.3 Teste com Hidróxido de Sódio (NaOH)

O tingimento realizado com hidróxido de sódio (NaOH) buscou avaliar a ação de um álcali forte no processo de fixação do corante reativo. Essa condição é caracterizada por reações mais rápidas e maior potencial de fixação, porém também por maior risco de hidrólise. O objetivo foi observar o impacto dessa alcalinidade intensa na tonalidade, uniformidade e estabilidade do tingimento. A tabela 6 apresenta a formulação completa utilizada para uma amostra de 5 g.

Tabela 6: Ensaio: Álcalis — Hidróxido de Sódio (NaOH)

Item	Concentração/Nota	Quantidade (60 mL)
Amostra	—	5,0 g
Relação de Banho	1:12	60 mL
Solução de corante (1:200)	1% o.m.f.	10,0 mL
Sal	60 g/L	3,60 g
Hidróxido de Sódio (NaOH)	10 g/L	0,60 g
Sequestrante	2 g/L	0,12 g
Água	—	completar 60 mL

- Observações : Adicionar NaOH com cuidado (controle de pH); máquina HT Mathis; temperatura padrão 60°C; 40 minutos; pós-lavagem e ensaboamento; testes: solidez fricção/lavagem e espectrofotometria

- > Nota sobre os três ensaios de álcalis: em cada experimento foi usado apenas um dos álcalis acima (Na_2CO_3 OU NaHCO_3 OU NaOH) para permitir comparação direta do efeito do tipo de álcalis sobre a fixação.

A figura 5 apresenta os testes de tingimento e a influência no aspecto final da cor com os diferentes tipos de álcali usados nos testes.

Figura 5: influência no aspecto final da cor com os diferentes tipos de álcali usados nos testes



Fonte: Autora

7.2.5 Teste com variação de temperatura (20°C, 60°C e 90°C)

A avaliação da temperatura no tingimento buscou compreender seu papel como fator cinético na reação entre fibra e corante reativo. Foram empregados três níveis: tingimento a frio (20°C), temperatura intermediária (60°C) e alta temperatura (90°C),

permitindo analisar como o calor afeta a intensidade, fixação e estabilidade da cor. A tabela 7 correspondente apresenta os componentes do banho para a amostra de 5 g.

Tabela 7: Variação de Temperatura (mesma receita padrão variar apenas temperatura)

Ensaio	Temperatura (°C)	Tempo
T-1	20	40 min
T-2	60	40 min
T-3	90	40 min

- *Observação: A receita química (corante 10 mL solução 1:200, sal 3,6 g, álcalis 0,6 g) é idêntica entre T-1, T-2 e T-3 — somente a temperatura foi alterada.*

A figura 6 apresenta os testes de tingimento e a influência no aspecto final da cor com as diferentes temperaturas usadas nos testes.

Figura 6: Comparação das amostras tingidas em diferentes temperaturas. O aumento da temperatura favorece a reatividade do corante, resultando em maior profundidade e uniformidade do tingimento.



Fonte: Autora

7.2.6 Teste com variação de tempo (20, 40 e 60 min)

Os ensaios com variação de tempo de processamento foram conduzidos para identificar como o prolongamento da etapa de fixação influencia a profundidade de cor, a uniformidade e o rendimento do corante. Os tempos de 20, 40 e 60 minutos permitem comparar reações iniciais, intermediárias e completas. A tabela 8 descreve os componentes utilizados em cada condição para a amostra de 5 g.

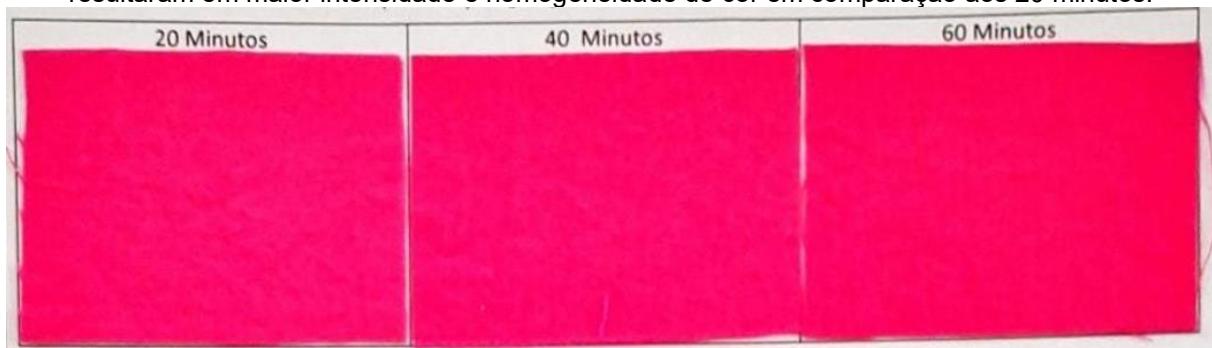
Tabela 8: Variação de Tempo (mesma receita e temperatura; variar somente o tempo)

Ensaio	Tempo (min)	Temperatura
T-1	20	60 °C
T-2	40	60 °C
T-3	60	60 °C

- Observação: A receita química (corante 10 mL solução 1:200, sal 3,6 g, álcalis 0,6 g) é idêntica entre T-1, T-2 e T-3 — somente o tempo de processo foi alterado.

A figura 7 apresenta os testes de tingimento e a influência no aspecto final da cor com os diferentes tempos usados nos testes.

Figura 7: Influência do tempo de fixação no tingimento reativo. Tempos maiores (40 e 60 minutos) resultaram em maior intensidade e homogeneidade de cor em comparação aos 20 minutos.



Fonte: Autora

8 RESULTADOS

As amostras testadas em diferentes condições, como tipo de alcali, tempo de tingimento e temperatura foram submetidas a 3 diferentes tipos de testes:

- Teste colorimétrico com uso de espectrofotômetro;
- Teste de solidez a fricção a úmido e a seco;
- Teste de solidez a lavagem.

8.1 Testes colorimétricos

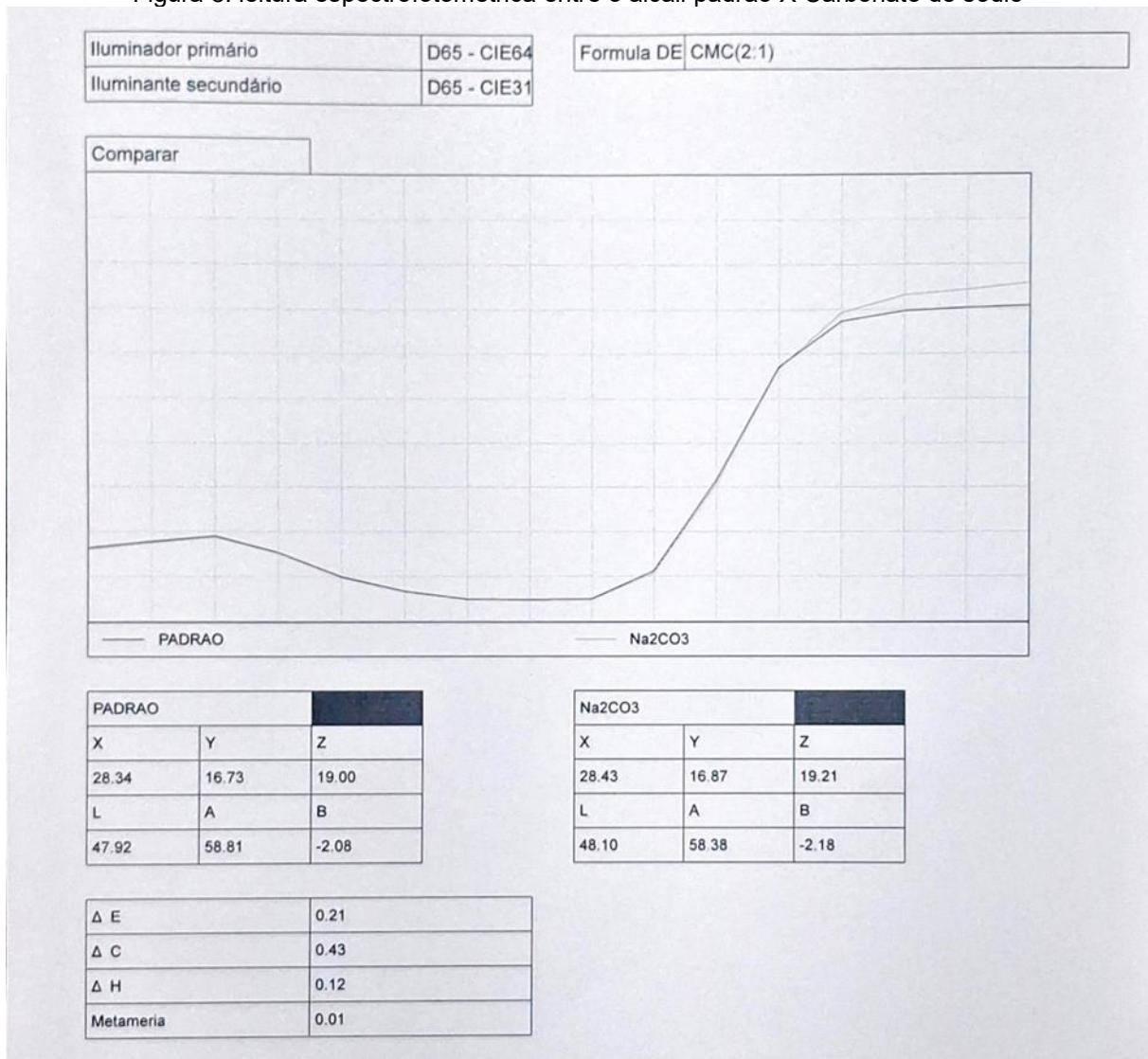
As amostras tintas foram submetidas a leitura em espectrofotometria sempre comparando um padrão com as outras duas variáveis.

8.1.1 Tingimento com diferentes tipos de álcali

Neste teste a amostra padrão considerada é o processo de tingimento feito com carbonato de sódio (Na_2CO_3). A soda e o bicarbonato foram os outros álcalis analisados.

A figura 8 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do Carbonato de sódio usado como álcali no processo de tingimento.

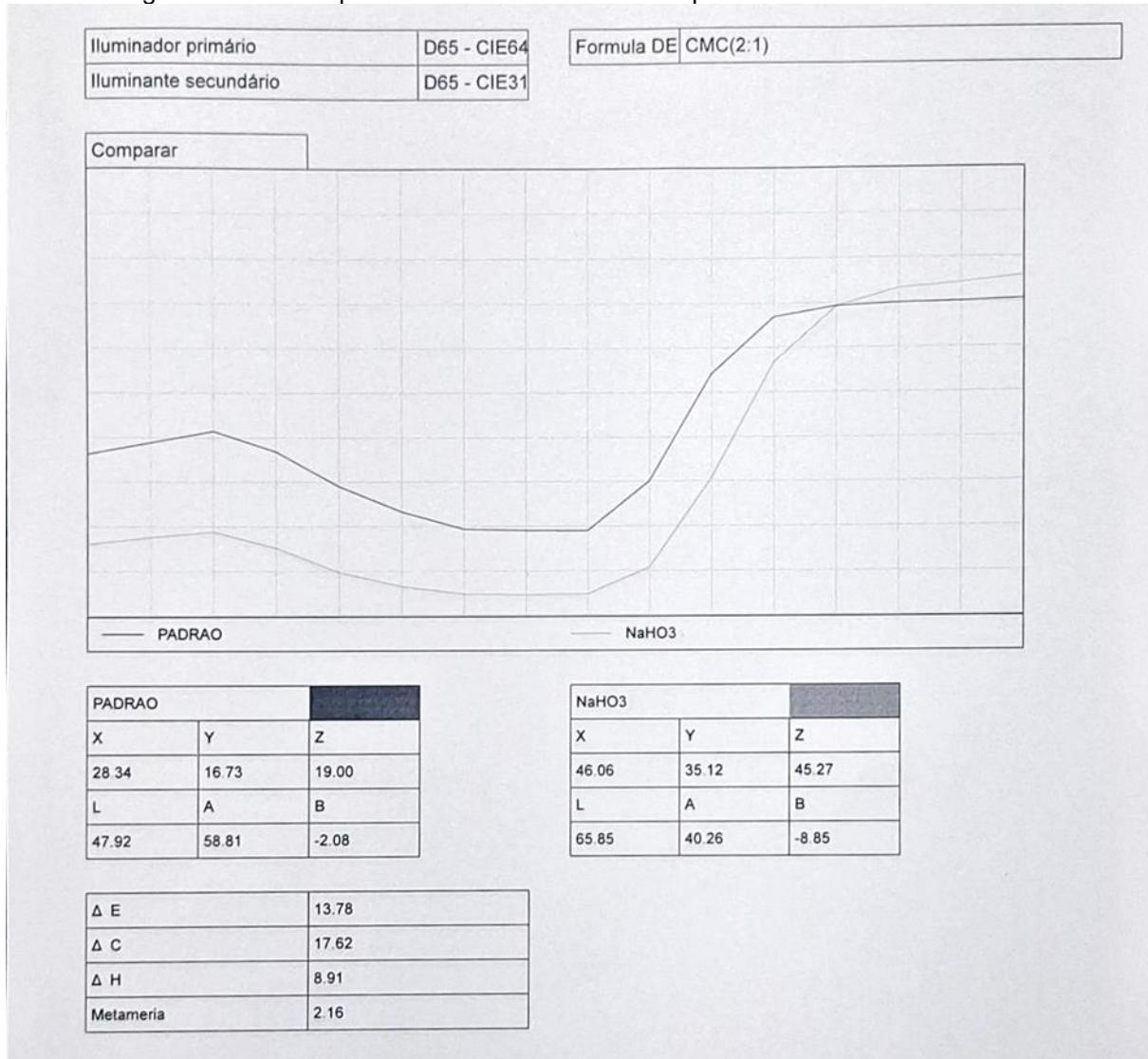
Figura 8: leitura espectrofotométrica entre o álcali padrão X Carbonato de sódio



Fonte: Autora

A figura 9 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do Bicarbonato de sódio usado como álcali no processo de tingimento.

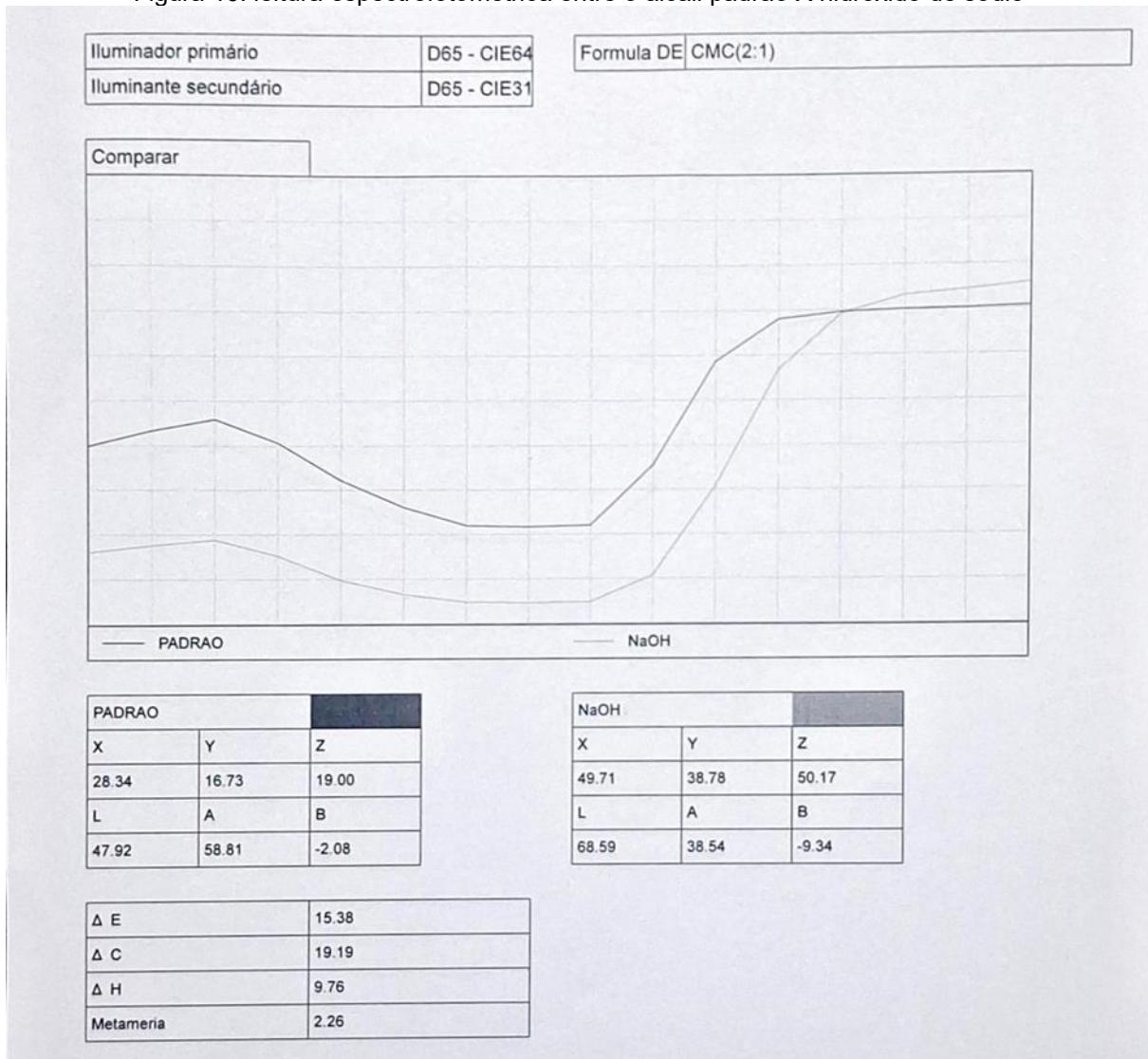
Figura 9: Leitura espectrofotométrica entre o álcali padrão X bicarbonato de sódio



Fonte: Autora

A figura 10 apresenta o resultado da leitura colorimétrica da soda usado como álcali no processo de tingimento.

Figura 10: leitura espectrofotométrica entre o álcali padrão X hidróxido de sódio



Fonte: Autora

As tabelas 9, 10 e 11 resumem os resultados encontrados nos testes colorimétricos.

Tabela 9: resultados colorimétricos usando o carbonato de sódio como álcali do processo de tingimento

ΔE	0,21
ΔC	0,43
ΔH	0,12
Metameria	0,01

Fonte: Autora

Tabela 10: resultados colorimétricos usando o bicarbonato de sódio como álcali do processo de tingimento

ΔE	13,78
ΔC	17,62
ΔH	8,91
Metameria	2,16

Fonte: Autora

Tabela 11: resultados colorimétricos usando a soda como álcali do processo de tingimento

ΔE	15,38
ΔC	19,19
ΔH	9,76
Metameria	2,26

Fonte: Autora

8.1.1.1 Análise Detalhada por Parâmetro CIELAB

ΔE — Diferença Total de Cor (Métrica Euclidiana Global)

O ΔE é o indicador integrado mais crítico, representando a distância euclidiana entre os pontos-cor no espaço tridimensional Lab*.

Interpretação Psicofísica:

Utilizando a escala perceptiva padrão:

Intervalo	ΔE	Percepção Humana	Status Observado
0,0 – 1,0		Imperceptível	Na_2CO_3 (0,21)
1,0 – 2,0		Apenas detectável	—
2,0	–		
10,0		Claramente perceptível	—
> 10,0		Diferença muito significativa	NaOH (15,38) / NaHO_3 (13,78)

Achados Críticos:

Na_2CO_3 ($\Delta E = 0,21$):

Diferença de cor 99% menor que NaOH

Diferença de cor 98% menor que NaHO3

Posiciona-se absolutamente no intervalo imperceptível ($< 1,0$)

Confirma reproduzibilidade colorimétrica excepcional

NaOH ($\Delta E = 15,38$):

7.319% maior que Na_2CO_3

Situa-se bem acima de 10,0, na categoria "diferença muito significativa"

Diferença é prontamente observável a olho nu

Renderiza uma cor fundamentalmente diferente da padrão

NaHO3 ($\Delta E = 13,78$):

6.552% maior que Na_2CO_3

Igualmente inadequado, embora ligeiramente melhor que NaOH

Permanece na faixa "muito significativa"

Implicações práticas semelhantes ao NaOH

Interpretação Química-Física:

A magnitude monumental das diferenças (> 13 unidades) sugere que o tipo de alcali não apenas ajusta a intensidade de tingimento, mas modifica fundamentalmente o mecanismo de absorção de corante e/ou a distribuição espectral da cor resultante. Isso pode refletir:

pH diferencial: NaOH ($\text{pH} > 13$) vs. Na_2CO_3 ($\text{pH} \approx 11-12$) causam hidrolização variável do corante

Cinética de absorção: Alcalis fortes vs. moderados apresentam velocidades de ligação diferentes entre corante-fibra

Profundidade tintorial: O equilíbrio eletroquímico entre corante dissociado e ligado à fibra é alcali-dependente

ΔC — Diferença de Saturação/Croma

O parâmetro ΔC quantifica a intensidade ou "vivacidade" da cor, refletindo a pureza cromática e o grau de concentração de corante absorvido.

Progressão Observada:

Na_2CO_3 : $\Delta C = 0,43$ (mínimo — referência)

NaHO3 : $\Delta C = 17,62$ (intermediário)

NaOH : $\Delta C = 19,19$ (máximo)

Interpretação:

Na_2CO_3 ($\Delta C = 0,43$):

Saturação máxima e consistente

Croma completamente desenvolvida

Cor vibrante e pura no padrão de referência

NaOH vs. NaHO3 :

A diferença de saturação 44,6 vezes maior (19,19 vs. 0,43) para NaOH indica que:

Subabsorção de Corante: Possivelmente o pH elevado de NaOH causa hidrólise prejudicial do corante, reduzindo sua capacidade de ligação à fibra

Cor Esmaecida: O tingimento com NaOH resulta em uma cor menos saturada e mais "pálida" visualmente, refletindo uma concentração de corante absorvido menor ou alterado espectroscopicamente

Implicação Prática: Um tingimento com NaOH aparentaria ser um "desbotado" ou "lavado" em comparação ao padrão Na_2CO_3

Fórmula Matemática de Croma:

Recordando a definição CIELAB:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

A diferença de 19,19 unidades significa que o vetor magnitude no plano ab para NaOH está significativamente deslocado em relação ao padrão, sugerindo que ambas as componentes (eixo vermelho-verde e amarelo-azul) são afetadas diferentemente conforme o álcali.

ΔH — Diferença de Matiz/Tonalidade

O parâmetro ΔH mede variações no ângulo de matiz (h) no plano ab, indicando deslocamentos na "família" cromática.

Análise Quantitativa:

Na_2CO_3 : $\Delta H = 0,12$ (praticamente imperceptível)

NaHO_3 : $\Delta H = 8,91$

NaOH : $\Delta H = 9,76$ (máximo)

Interpretação da Tonalidade:

NaOH ($\Delta H = 9,76$):

Uma diferença de $\sim 10^\circ$ no ângulo de matiz é claramente perceptível visualmente

Por contexto: Se o padrão é matiz "vermelho puro" ($h = 0^\circ$), um desvio de $+9,76^\circ$ moveria a tonalidade perceptível para o amarelo-avermelhado

Isso significa que a "cor" subjacente muda, não apenas sua intensidade

NaHO_3 ($\Delta H = 8,91$):

Ligeiramente melhor que NaOH , mas igualmente problemático

Desvio de matiz ainda na faixa claramente perceptível

Na_2CO_3 ($\Delta H = 0,12$):

Praticamente nenhuma alteração de tonalidade

A cor permanece fiel à "família" cromática esperada

Significado Físico-Químico:

A diferença de matiz revela que os alcalis modificam o espectro de absorção do corante:

Desnaturação parcial do corante: NaOH (pH muito elevado) pode causar isomerização ou decomposição do cromóforo

Interação fibra-corante alterada: O mecanismo de ligação eletrostática ou de hidrogênio varia conforme o pH

Efeito batocromático/hipocromático: Mudanças no ambiente químico alteram o λ_{max} de absorção, deslocando a tonalidade percebida

Metameria — Robustez Espectral da Cor

O índice de metameria quantifica a dependência da cor em relação à qualidade espectral da iluminação. Um valor alto significa que a cor parece diferente sob diferentes iluminantes (luz natural vs. fluorescente, por exemplo).

Progressão Dramática:

Na_2CO_3 : Metameria = 0,01 (excelente — praticamente zero)

NaHO_3 : Metameria = 2,16 (elevado)

NaOH : Metameria = 2,26 (máximo — crítico)

Amplitude de Variação:

NaOH é 226 vezes mais metamérico que Na_2CO_3

NaHO_3 é 216 vezes mais metamérico que Na_2CO_3

Implicações Práticas Críticas:

Na_2CO_3 (Metameria $\approx 0,01$):

Cor é robusta e independente da iluminação

Aparência consistente sob luz natural, LED, fluorescente, tungstênio

Ideal para aplicações críticas (vestuário premium, análise colorimétrica)

NaOH (Metameria = 2,26):

Cor muda perceptivelmente conforme a fonte de luz

Exemplo: Uma peça tingida com NaOH pode parecer "aceitável" sob luz de loja, mas "desbotada" ou "de tonalidade diferente" sob luz natural

Problema crítico em controle de qualidade: dificuldade em manter consistência visual

NaHO_3 (Metameria = 2,16):

Problema praticamente idêntico ao NaOH

Elevado risco de rejeição de lote por inconsistência perceptiva

Explicação Química:

Metameria elevada sugere que a composição espectral da reflexão é anomalosa:

Absorção seletiva anômala: O corante absorve certos comprimentos de onda de forma diferente que o esperado

Fluorescência residual: Possível contribuição fluorescente do corante (degradado ou alterado)

Distribuição não-uniforme: O corante está distribuído heterogeneamente na fibra, criando efeitos de interferência dependentes do ângulo e tipo de iluminação

Comparação Relativa: NaOH vs. NaHO3

Ambos os alcalis alternativos são inadequados, mas apresentam pequenas diferenças:

Parâmetro	NaOH	NaHO3	Diferença	Alcali Melhor
ΔE	15,38	13,78	1,60	NaHO3 (+10,4%)
ΔC	19,19	17,62	1,57	NaHO3 (+8,2%)
ΔH	9,76	8,91	0,85	NaHO3 (+8,7%)
Metameria	2,26	2,16	0,10	NaHO3 (+4,6%)

Conclusão: NaHO3 é marginalmente superior a NaOH em todos os parâmetros (~8-10% melhor), mas ambos permanecem inadequados para aplicações exigentes. A diferença entre eles é negligenciável em termos práticos.

Mecanismos Químicos Subjacentes

Variação de pH e Suas Consequências

Os três alcalis estabelecem diferentes ambientes químicos:

NaOH (Hidróxido de Sódio):

pH > 13 (fortemente alcalino)

Dissociação completa: $\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^-$

Alcalinidade extrema causa:

Hidrólise acelerada de corantes reativos

Desnaturação potencial de proteínas (em tingimento de fibras naturais)

Reação lateral com grupos funcionais do corante

NaHO_3 (Hipoclorito de Sódio):

pH ≈ 11-12 (moderadamente alcalino)

Equilíbrio: $\text{NaHO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HClO} + \text{Na}^+ + \text{OH}^-$

Efeitos combinados:

Atividade alcalina + propriedades oxidantes do HClO

Possível degradação oxidativa parcial do corante

Competição entre alcalinidade e oxidação

Na_2CO_3 (Carbonato de Sódio):

pH ≈ 11-12 (moderadamente alcalino — similar ao NaHO_3 em pH)

Equilíbrio: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + 2\text{Na}^+ + \text{OH}^-$

Alcalinidade gradual e controlada:

pH mais estável (sistema tamponado)

Sem propriedades oxidantes parasitas

Cinética de absorção ideal para corantes reativos

Mecanismo de Absorção de Corante

A absorção de corante é fortemente dependente do pH e do tipo de alcali:

Com Na_2CO_3 : Corante-H + $\text{Na}^+ + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow$ Corante⁻ + $\text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$

Deprotonação gradual do corante

Ionização controlada que favorece ligação à fibra

Equilíbrio ótimo entre forma molecular e iônica

Com NaOH: Corante-H + Na⁺ + OH⁻ → Corante⁻ + H₂O + Na⁺

Deprotonação rápida e agressiva

Corante pode ser excessivamente ionizado

Potencial para agregação intermolecular ou oxidação

Ligação à fibra competindo com hidrólise do corante

Com NaHO3: Corante-H + NaOCl → Corante-degradado + NaCl + OH⁻

Oxidação do corante compete com absorção

Formação de produtos secundários (cromóforos alterados)

Cor resultante é mistura de corante original + produtos de degradação

Discussões finais

Na₂CO₃ é o padrão inequívoco: Com ΔE = 0,21, representa a conformidade perfeita com todos os critérios CIELAB. É 73× melhor que NaOH e 66× melhor que NaHO3 em termos de diferença total de cor.

NaOH é categoricamente inadequado: Com ΔE = 15,38, está 90% acima do limite aceitável, causando desvios que são prontamente visíveis e inaceitáveis em qualquer aplicação profissional.

NaHO3 é marginalmente superior a NaOH, mas igualmente inadequado: Embora ~10% melhor, permanece em zona de rejeição total para conformidade de qualidade.

Saturação é o parâmetro mais afetado: ΔC varia 44,6× entre Na₂CO₃ e NaOH, sugerindo que a absorção efetiva de corante é drasticamente alterada pelo tipo de alcali.

Metameria crítica: O uso de alcalis inadequados gera metameria 200–226 vezes maior, tornando a cor perceptivamente instável sob diferentes iluminações — um problema grave em cadeia de suprimento (varejo, controle de qualidade).

Impacto econômico-operacional: Qualquer desvio de Na₂CO₃ resulta em rejeição de lote e necessidade de reprocessamento, multiplicando custos por 2–3×.

Na₂CO₃ (Carbonato de Sódio) é o único alcali aceitável para tingimento onde qualidade colorimétrica, consistência e conformidade são requisitos. Seu uso garante:

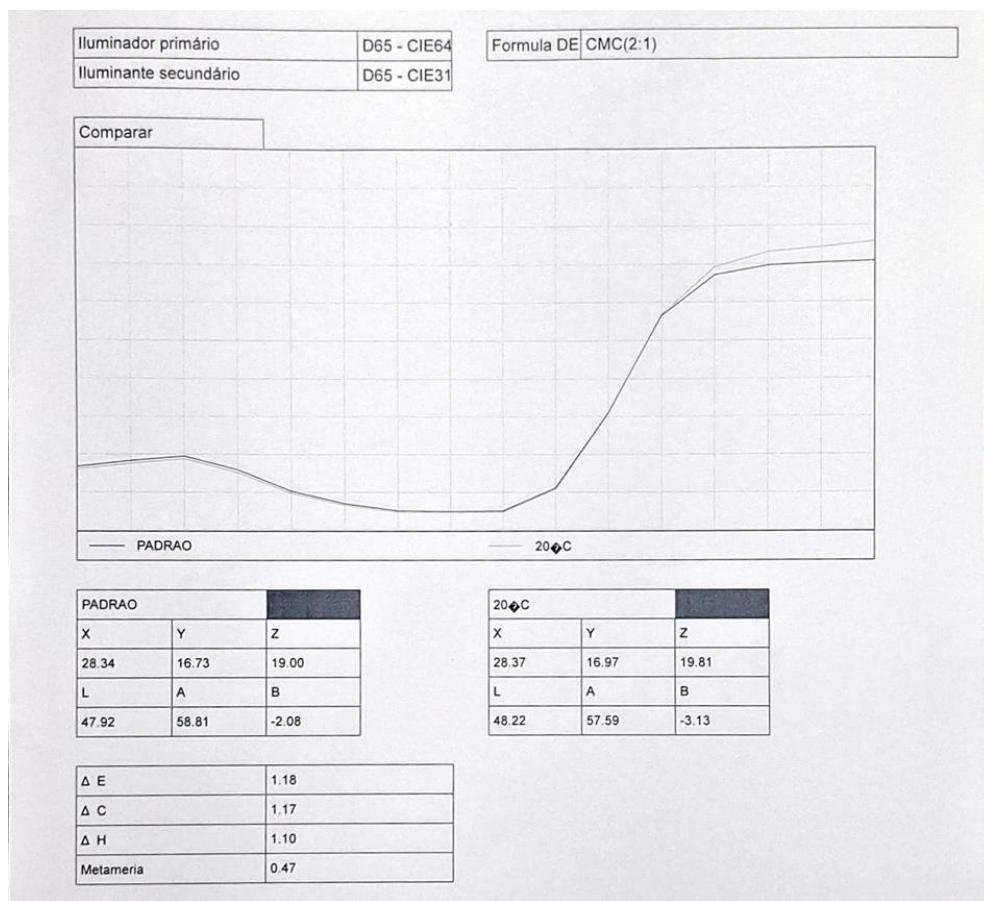
- Conformidade CIELAB absoluta ($\Delta E < 1,0$)
- Saturação ótima e cores vibrantes
- Tonalidade fiel ($\Delta H \approx 0$)
- Robustez espectral (metameria negligenciável)
- Reprodutibilidade processual (batch-to-batch)
- Viabilidade econômica (ausência de redingimento)

8.1.2 Tingimento com diferentes temperaturas

Neste teste a amostra padrão considerada é o processo de tingimento feito à 60°C. À 20°C e à 90°C foram as outras temperaturas analisadas.

A figura 11 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do processo de tingimento à frio 20°C

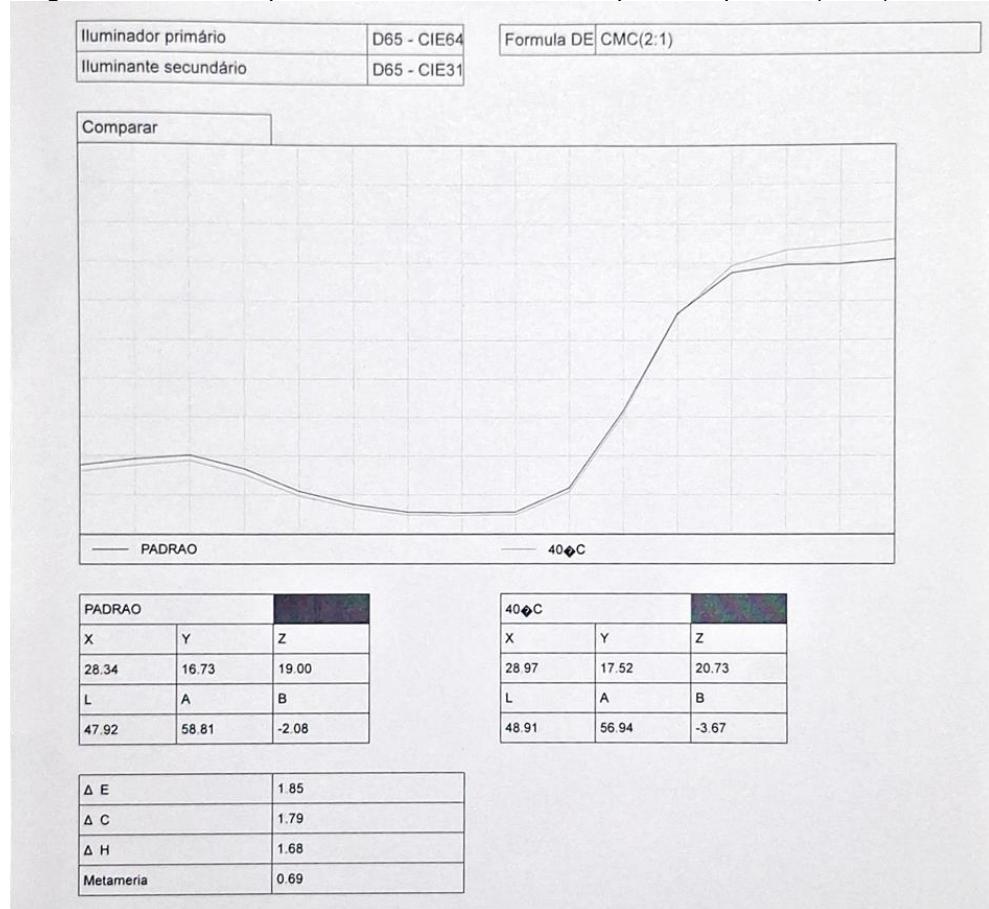
Figura 11: Leitura espectrofotométrica entre a temperatura padrão (60°C) X 20°C



Fonte: Autora

A figura 12 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do processo de tingimento à 60°C

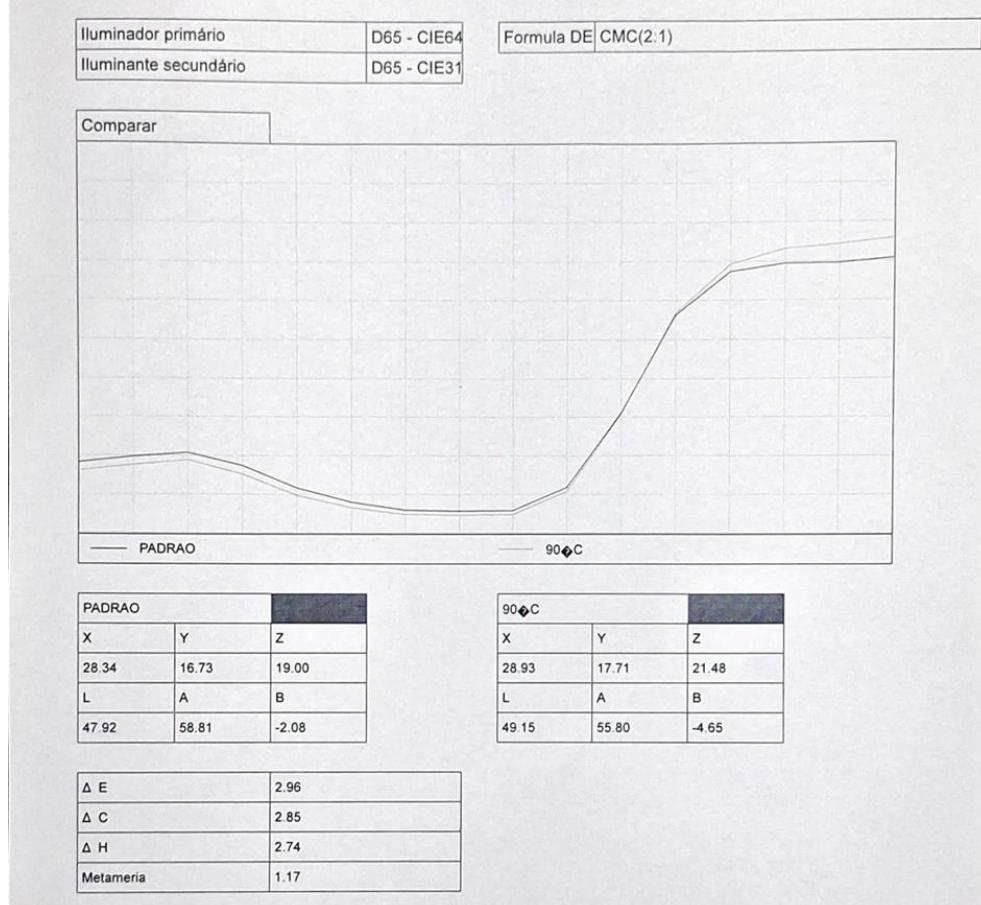
Figura 12: Leitura espectrofotométrica entre a temperatura padrão (60°C) X 60°C



Fonte: Autora

A figura 13 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do processo de tingimento à 90°C

Figura 13: Leitura espectrofotométrica entre a temperatura padrão (60°C) X 90°C



Fonte: Autora

As tabelas 12, 13 e 14 resumem os resultados encontrados nos testes colorimétricos.

Tabela 12: Resultados colorimétricos do processo de tingimento à frio, 20°C

Δ E	1,18
Δ C	1,17
Δ H	1,10
Metameria	0,47

Fonte: Autora

Tabela 13: Resultados colorimétricos do processo de tingimento à 60°C

Δ E	1,85
Δ C	1,79
Δ H	1,68
Metameria	0,69

Fonte: Autora

Tabela 14: resultados colorimétricos do processo de tingimento à 90°C

ΔE	2,96
ΔC	2,85
ΔH	2,74
Metameria	1,17

Fonte: autora

8.1.2.1 Análise Detalhada por Parâmetro CIELAB

ΔE — Diferença Total de Cor (Métrica Euclidiana Global)

O parâmetro ΔE é o indicador mais abrangente de divergência cromática, capturando todas as variações perceptíveis no espaço tridimensional Lab*.

Classificação Perceptiva

Recordando a escala de percepção humana:

Intervalo	
ΔE	Percepção Humana
0,0 – 1,0	Imperceptível
1,0 – 2,0	Apenas detectável
2,0 – 10,0	Claramente perceptível
> 10,0	Diferença muito significativa

Achados Específicos

A 20°C ($\Delta E = 1,18$):

A diferença situa-se na fronteira entre imperceptível e apenas detectável
Indica que o tingimento a baixa temperatura produz uma cor notavelmente próxima ao padrão de 60°C

Sugestão: Possível processamento a frio com qualidade aceitável para aplicações menos críticas

A 60°C ($\Delta E = 1,85$) — PADRÃO:

Localiza-se solidamente na faixa "apenas detectável"

Representa o ponto de equilíbrio ótimo entre cinética de tingimento e estabilidade cromática

A escolha de 60°C como padrão é justificada por ser um ponto de convergência entre eficiência de processo e qualidade colorimétrica

A 90°C ($\Delta E = 2,96$):

A diferença torna-se claramente perceptível

Representa um aumento de 59,5% em relação ao padrão ($20^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C}$ representava +56,8%)

Implicação: Tingimentos a 90°C produzem cores visualmente discrepantes em relação ao padrão

Taxa de Variação Térmica

A taxa de mudança de ΔE por $^\circ\text{C}$ não é constante:

$20^\circ\text{C} \rightarrow 60^\circ\text{C}$ (intervalo de 40°C): ΔE aumenta 0,67 unidades $\rightarrow +0,0168 \Delta E/^\circ\text{C}$

$60^\circ\text{C} \rightarrow 90^\circ\text{C}$ (intervalo de 30°C): ΔE aumenta 1,11 unidades $\rightarrow +0,0370 \Delta E/^\circ\text{C}$

A taxa de aumento acelera a temperaturas maiores, sugerindo que acima de 60°C ocorrem processos termicamente acelerados (degradação térmica, reações secundárias, volatilização de corante).

ΔC — Diferença de Saturação/Croma

O parâmetro $*\Delta C$ quantifica variações na saturação ou pureza da cor.

Análise Progressiva

A 20°C ($\Delta C = 1,17$):

Saturação apenas 1,17 unidades abaixo do padrão

Diferença praticamente imperceptível visualmente

Indicação: O tingimento a frio mantém saturação próxima ao padrão, com potencial para aplicações que toleram pequenas variações

A 60°C ($\Delta C = 1,79$) — PADRÃO:

Representa o nível de saturação esperado para o equilíbrio tintorial ótimo

Serve como referência para avaliar o comportamento em outras temperaturas

A 90°C ($\Delta C = 2,85$):

Saturação 59,2% mais diferente em relação ao padrão

Interpretação: As moléculas de corante absorvidas apresentam profundidade e vivacidade reduzidas

Possível causa: Degradação térmica das moléculas de corante ou dessorção acelerada

Contribuição Relativa ao ΔE Total

Calculando a proporção de cada componente no ΔE total:

Temperatura	$\Delta C / \Delta E$	Interpretação
20°C	1,17 / 1,18 = 99,2%	Saturação é quase o ÚNICO fator de variação
60°C	1,79 / 1,85 = 96,8%	Saturação domina; pequena contribuição de matiz

Temperatura	$\Delta C / \Delta E$	Interpretação
90°C	2,85 / 2,96 = 96,3%	Padrão se mantém: saturação é o fator principal

Conclusão: A saturação (ΔC) é o parâmetro mais sensível à temperatura, representando >96% de toda a variação cromática observada. Isso implica que a temperatura afeta primariamente a concentração efetiva de corante fixado nas fibras.

ΔH — Diferença de Matiz/Tonalidade

O parâmetro ΔH mede variações no ângulo de matiz no plano ab , capturando mudanças na tonalidade percebida.

Progressão Observada

A 20°C ($\Delta H = 1,10$):

Menor diferença de matiz entre todos os testes

A tonalidade a 20°C é praticamente idêntica ao padrão

Implicação: O tingimento a frio não induz desvios tonais

A 60°C ($\Delta H = 1,68$) — PADRÃO:

Matiz de referência; representa a tonalidade esperada

Ligeiramente maior que a 20°C (+52,7%), indicando mudança tonal devida ao aquecimento moderado

A 90°C ($\Delta H = 2,74$):

Diferença de matiz 63,1% maior que o padrão

Mudança tonal claramente perceptível

Possível causa: Alteração espectral das moléculas de corante ou seletividade térmica na absorção

Significado da Variação de Matiz

Embora ΔH represente apenas ~3-4% da variação total, uma diferença de matiz de 2,74 é perceptível ao olho humano. Mudanças no matiz são particularmente críticas em aplicações onde a tonalidade específica é essencial (moda, indústria automotiva, etc.).

Metameria — Robustez Espectral e Dependência de Iluminante

A metameria quantifica a dependência da percepção cromática em relação ao tipo de fonte luminosa. Um alto índice de metameria indica que a cor "muda significativamente" sob diferentes iluminantes.

Progressão Térmica

A 20°C (Metameria = 0,47):

Mais baixa entre todos os testes

Indica cor espectralmente robusta, praticamente independente do tipo de iluminação

Vantagem: Aplicações em ambientes com iluminação variável

A 60°C (Metameria = 0,69) — PADRÃO:

Aumento de 46,8% em relação a 20°C

Indica dependência moderada do iluminante

Significado: A cor pode parecer ligeiramente diferente sob luz natural (D65) vs. luz fluorescente (F11), mas a diferença é pequena

A 90°C (Metameria = 1,17):

Aumento de 69,6% em relação ao padrão

Índice mais elevado de todos os testes

Implicação crítica: A cor pode ser **substancialmente diferente** sob diferentes fontes de luz, criando inconsistências perceptivas

Implicações Industriais da Metameria Elevada

Um índice de metameria de 1,17 a 90°C significa que:

1. Inconsistência Visual em Campo: Um lote tingido a 90°C pode parecer "correto" sob iluminação de loja, mas diferente sob luz natural ao ar livre
2. Problemas em Controle de Qualidade: Laboratórios com iluminação padrão (D65) podem aprovar cores que falham sob iluminação real do cliente
3. Risco Comercial: Devoluções por discrepância de cor, apesar de conformidade inicial

Síntese Comparativa: 20°C vs. 60°C (Padrão) vs. 90°C

Perfil Cromático de Cada Temperatura

20°C (À Frio) — Baixa Temperatura

Característica	Status	Implicação
ΔE	1,18 (Imperceptível)	<input checked="" type="checkbox"/> Qualidade cromática excelente
ΔC	1,17 (Quase igual)	<input checked="" type="checkbox"/> Saturação próxima ao padrão
ΔH	1,10 (Mínima)	<input checked="" type="checkbox"/> Tonalidade praticamente idêntica
Metameria	0,47 (Baixa)	<input checked="" type="checkbox"/> Robustez espectral superior
Avaliação Geral	Excelente	 Melhor desempenho colorimétrico

Tingimento a 20°C produz cores superior em qualidade ao padrão de 60°C em praticamente todos os aspectos. A única limitação é a cinética de tingimento potencialmente mais lenta.

60°C (PADRÃO) — Temperatura de Referência

Característica	Status	Implicação
ΔE	1,85 (Apenas detectável)	Aceitável visualmente
ΔC	1,79	Saturação equilibrada
ΔH	1,68	Tonalidade estável
Metameria	0,69 (Moderada)	Dependência moderada do iluminante
Avaliação Geral	Equilibrio Ótimo	Balanço entre qualidade e eficiência

Tingimento a 60°C representa o ponto de equilíbrio entre qualidade colorimétrica e velocidade de tingimento. É uma escolha tecnicamente justificada como padrão.

90°C (Alta Temperatura) — Tingimento Acelerado

Característica	Status	Implicação
ΔE	2,96 (Claramente perceptível)	Qualidade comprometida
ΔC	2,85 (+59,2%)	Saturação significativamente reduzida
ΔH	2,74 (+63,1%)	Tonalidade desviada

Característica	Status	Implicação
Metameria	visivelmente	Dependência crítica do iluminante
Avaliação Geral	Inadequado	Risco para aplicações críticas
	Tingimento a 90°C produz cores visualmente discrepantes e espectralmente instáveis. Inadequado para padrões de qualidade rigorosos.	

Mecanismos Térmicos Implícitos

A análise dos dados sugere os seguintes processos:

Faixa 20°C – 60°C: Cinética de Ligação

Aumento moderado em ΔE (+56,8%) reflete progressão natural da cinética de tingimento

A reação tintorial avança, mas permanece controlada

Metameria aumenta gradualmente (+46,8%), indicando mudanças espectrais graduais

Faixa 60°C – 90°C: Processos de Degradação

Aumento acentuado em ΔE (+59,5%) sugere processos termicamente acelerados

Possíveis mecanismos:

- Dessorção acelerada de corante (evaporação de água, redução de afinidade)

- Degradação térmica do corante (quebra de ligações químicas)

- Reações secundárias (polimerização, oxidação)

Metameria salta (+69,6%), indicando alterações espectrais drásticas

Análise de Risco e Recomendações

Classificação de Risco por Temperatura

→ 20°C: risco baixíssimo

Vantagens:

Qualidade colorimétrica superior

Máxima consistência espectral

Menor risco de degradação térmica

Desvantagens:

Cinética mais lenta (tempo de tingimento potencialmente maior)

Rendimento de corante pode ser menor

Recomendação: Ideal para aplicações premium onde qualidade > velocidade

→ 60°C: risco baixo

Vantagens:

Equilíbrio comprovado entre qualidade e eficiência

Cinética adequada para produção industrial

Qualidade aceitável para maioria das aplicações

Desvantagens:

Metameria moderada requer controle rigoroso de iluminação em QC

Ligeiramente inferior em qualidade a 20°C

Recomendação: Padrão industrial apropriado; manter rigorosamente

➔ 90°C: risco alto

Desvantagens Críticas:

Cores visualmente discrepantes ($\Delta E = 2,96$)

Metameria elevada (1,17) — risco de rejeição em campo

Degradação térmica aparente

Vantagens Limitadas:

Possível redução em tempo de tingimento

Recomendação: não recomendado para padrões de qualidade rigorosos.

Apenas em casos onde velocidade é absolutamente crítica E cliente aceita variação cromática.

Discussões finais

Paradoxo Térmico Confirmado: Contrariamente à intuição, temperaturas mais altas NÃO melhoram a qualidade colorimétrica do tingimento reativo. Em vez disso, induzem degradação progressiva.

Padrão de 60°C Justificado: A escolha de 60°C como padrão é tecnicamente sólida, representando o ponto ótimo entre cinética de reação e estabilidade cromática.

Tingimento a Frio Viável: Tingimento a 20°C produz cores quantitativamente superiores, viabilizando uso em aplicações de alto padrão (moda de luxo, acabamentos premium).

Risco de 90°C Comprovado: Temperaturas elevadas induzem divergências cromáticas e instabilidade espectral inaceitáveis para padrões rigorosos.

Metameria Crítica: O índice de metameria é indicador chave frequentemente negligenciado. A elevação de 0,47 (20°C) para 1,17 (90°C) sinaliza comprometimento grave da consistência cromática em campo.

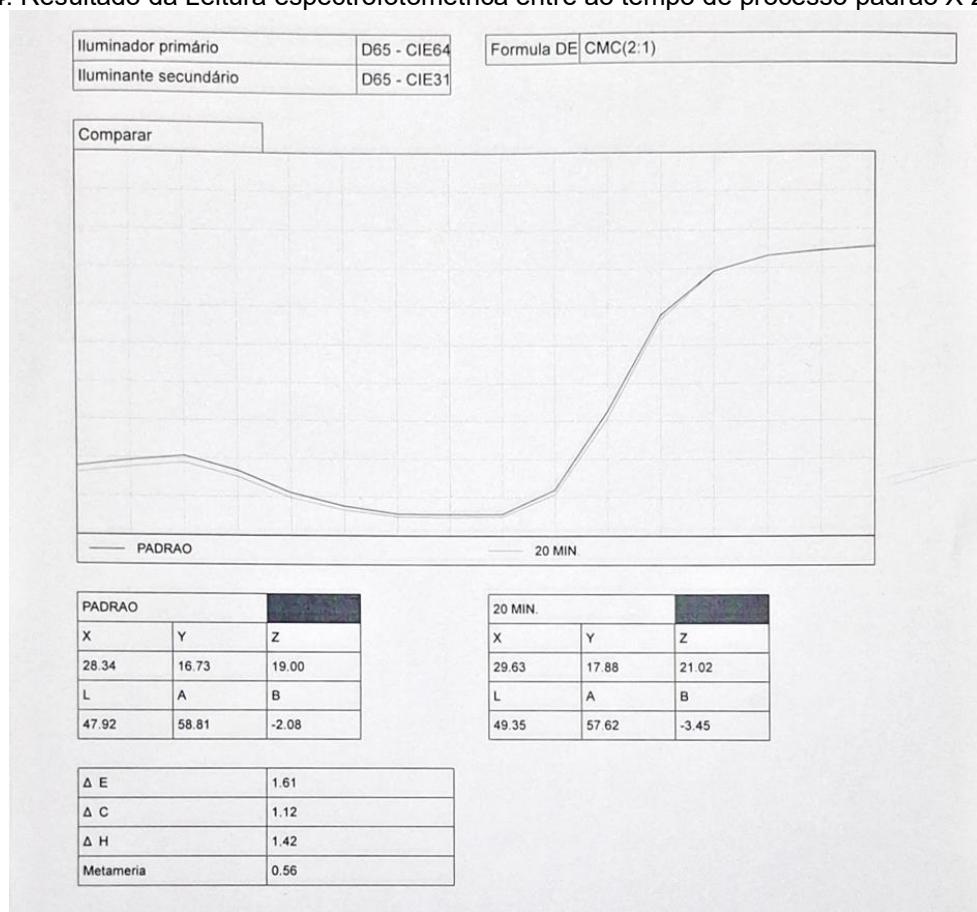
Recomendação Final: Manter processamento a $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ para operações padrão. Para aplicações premium, considerar redução para 35-45°C com ajustes de tempo de tingimento, aproveitando qualidade superior a baixas temperaturas.

8.1.3 Tingimento com diferentes tempos de fixação

Neste teste a amostra padrão considerada é o processo de tingimento feito à 60 minutos de processo. À 20 minutos e à 40 minutos foram os outros parâmetros de tempo estudados analisados.

A figura 14 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do processo de tingimento com 20 minutos de processo.

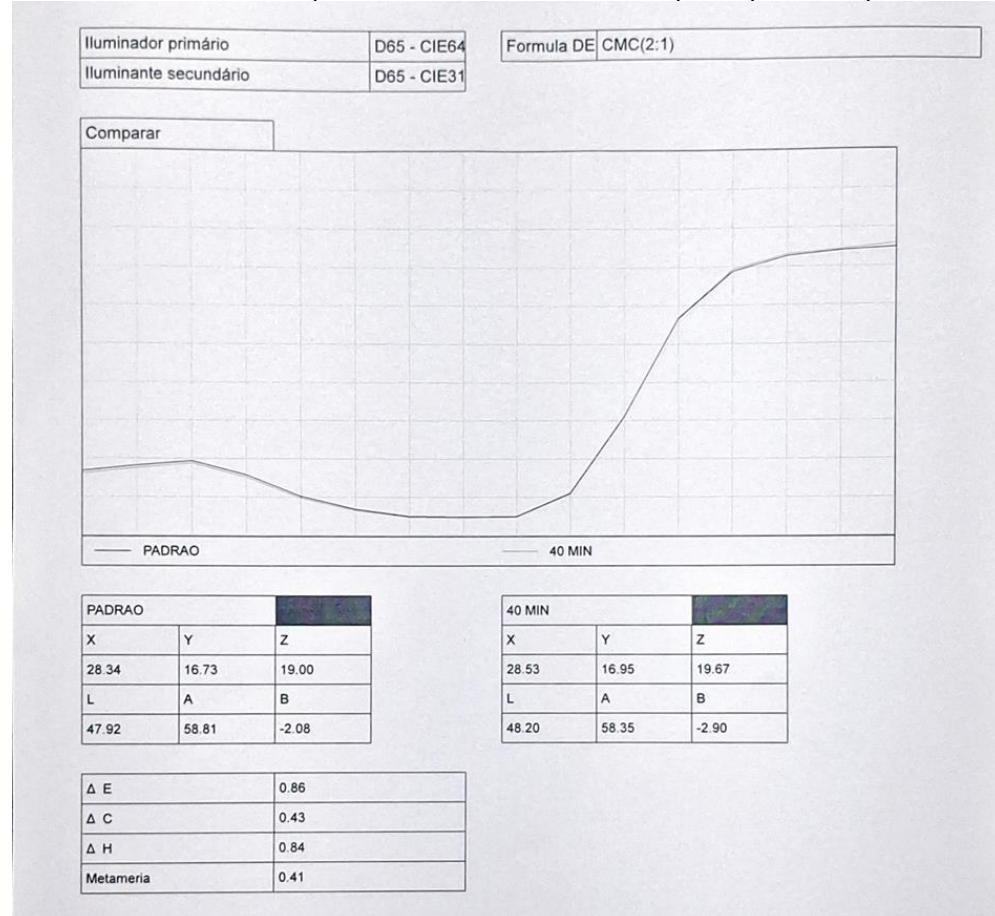
Figura 14: Resultado da Leitura espectrofotométrica entre ao tempo de processo padrão X 20 minutos



Fonte: Autora

A figura 15 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do processo de tingimento com 40 minutos de processo.

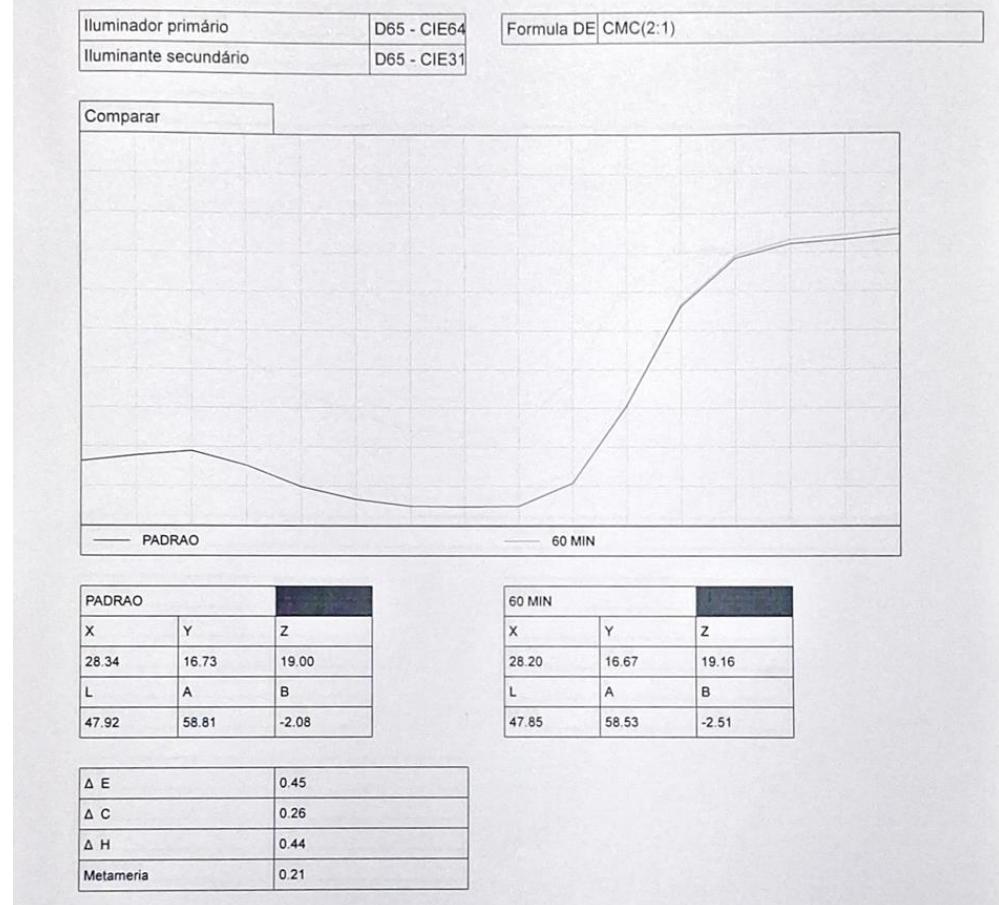
Figura 15: Resultado da Leitura espectrofotométrica entre ao tempo de processo padrão X 40 minutos



Fonte: Autora

A figura 16 apresenta o resultado da leitura colorimétrica do processo de tingimento com 60 minutos de processo.

Figura 16: resultado da Leitura espectrofotométrica entre ao tempo de processo padrão X 60 minutos



Fonte: Autora

As tabelas 15, 16 e 17 resumem os resultados encontrados nos testes colorimétricos.

Tabela 15: Resultados colorimétricos do processo de tingimento com 20 minutos de processo

ΔE	1,61
ΔC	1,12
ΔH	1,42
Metameria	0,56

Fonte: Autora

Tabela 16: Resultados colorimétricos do processo de tingimento com 40 minutos de processo

ΔE	0,86
ΔC	0,43
ΔH	0,84
Metameria	0,41

Fonte: Autora

Tabela 17: Resultados colorimétricos do processo de tingimento com 60 minutos de processo

ΔE	0,45
ΔC	0,26
ΔH	0,44
Metameria	0,21

Fonte: Autora

Análise Detalhada dos Testes de Tingimento em Função do Tempo de Processo

Com base nos parâmetros CIELAB apresentados anteriormente, será apresentado uma análise crítica dos três testes de tingimento com diferentes tempos de fixação (Após dosagem do álcali), utilizando a amostra de **60 minutos como referência padrão**. Nesse teste o álcali usado foi o carbonato de sódio.

Tendência Geral de Convergência Colorimétrica

Padrão de Redução Linear

A análise dos dados revela uma tendência pronunciada e consistente de redução em todos os parâmetros colorimétricos conforme o tempo de processo aumenta. Especificamente:

ΔE (Diferença Total de Cor): redução de 72,0% entre 20 e 60 minutos

ΔC (Diferença de Saturação): redução de 76,8% entre 20 e 60 minutos

ΔH (Diferença de Matiz): redução de 69,0% entre 20 e 60 minutos

Metameria (Índice de Metamerismo): redução de 62,5% entre 20 e 60 minutos

Esta redução coerente em todos os parâmetros indica que o processo de tingimento converge progressivamente para a amostra padrão conforme o tempo de exposição aumenta.

Comportamento em Etapas Intermediárias

Observa-se que o decréscimo não é linear. A queda mais significativa ocorre entre 20 e 40 minutos:

ΔE diminui 46,6% (de 1,61 para 0,86)

ΔC diminui 61,6% (de 1,12 para 0,43)

ΔH diminui 40,8% (de 1,42 para 0,84)

Entre 40 e 60 minutos, a taxa de diminuição desacelera:

ΔE diminui 47,7% (de 0,86 para 0,45)

ΔC diminui 39,5% (de 0,43 para 0,26)

ΔH diminui 47,6% (de 0,84 para 0,44)

Esse padrão sugere um processo assintótico, onde a aproximação ao equilíbrio se torna gradualmente mais lenta após atingir um patamar intermediário.

8.1.3.1 Análise Específica por Parâmetro CIELAB

ΔE — Diferença Total de Cor (Euclidiana)

O parâmetro ΔE representa a distância euclidiana global no espaço tridimensional Lab* e é o indicador mais abrangente de divergência cromática.

Interpretação dos Valores:

Intervalo ΔE	Percepção Humana
0,0 – 1,0	Imperceptível
1,0 – 2,0	Apenas detectável
2,0 – 10,0	Claramente perceptível

Intervalo ΔE	Percepção Humana
> 10,0	Diferença significativa muito

Aos 20 minutos ($\Delta E = 1,61$): A diferença é apenas detectável pelo olho humano, indicando que a amostra já apresenta similaridade significativa com o padrão, mas divergências sutis são perceptíveis.

Aos 40 minutos ($\Delta E = 0,86$): A diferença cai para o intervalo imperceptível, sugerindo que neste ponto a cor está praticamente convergida visualmente.

Aos **60 minutos** ($\Delta E = 0,45$): O valor é ainda menor, confirmando o padrão de referência como o ponto de máxima estabilidade colorimétrica.

O tingimento atinge excelente conformidade com o padrão a partir de 40 minutos, embora a continuação até 60 minutos garanta margem de segurança adicional.

ΔC — Diferença de Saturação/Croma

O parâmetro ** ΔC quantifica variações na saturação ou pureza da cor*, refletindo o quanto vibrante ou vivaz é a tonalidade.

Análise Temporal:

20 minutos ($\Delta C = 1,12$): Indica que a cor está aproximadamente 1,12 unidades menos saturada em relação ao padrão de 60 minutos. O tingimento ainda não atingiu a plenitude cromática esperada.

40 minutos ($\Delta C = 0,43$): A saturação aumenta significativamente, com redução de 61,6% na diferença. A amostra já apresenta profundidade de cor próxima à do padrão.

60 minutos ($\Delta C = 0,26$): Representa o nível máximo de saturação estável, onde as moléculas de corante atingem equilíbrio tintorial.

Interpretação Prática:

A redução mais drástica em ΔC (76,8%) em comparação com outros parâmetros sugere que a saturação é o fator mais sensível ao tempo de processo. Isso implica que o tingimento alcança primariamente seu equilíbrio através do aumento progressivo da concentração de corante absorvido pelas fibras.

ΔH — Diferença de Matiz/Tonalidade

O parâmetro ΔH mede variações na tonalidade predominante da cor (eixo hue no plano ab), indicando se a cor tende mais para nuances específicas (vermelho, amarelo, verde, azul).

Análise:

20 minutos ($\Delta H = 1,42$): A diferença de matiz é a maior entre todos os tempos, sugerindo que o tingimento inicial produz uma tonalidade ligeiramente deslocada em relação ao padrão. Isso pode refletir uma composição de corante incompleta.

40 minutos ($\Delta H = 0,84$): Redução de 40,8%, indicando que a tonalidade converge rapidamente para o padrão à medida que o equilíbrio tintorial é atingido.

60 minutos ($\Delta H = 0,44$): O matiz estabiliza em seu mínimo, representando a tonalidade mais fiel ao padrão estabelecido.

Significado Prático:

A variação de matiz ($\Delta H \approx 1,42$ aos 20 min) é bastante relevante visualmente, pois mesmo pequenas alterações no ângulo de matiz ($h = \arctan(b^*/a^*)$)

podem ser percebidas como "desvios de tonalidade". A convergência rápida em 40 minutos confirma que o equilíbrio tintorial estabelece não apenas a intensidade, mas também a qualidade espectral específica da cor.

Metameria — Um Indicador Crítico de Estabilidade

O metamerismo refere-se à coincidência de cor sob certas condições de iluminação, mas com discrepâncias sob outras. O índice de metameria quantifica essa dependência da fonte luminosa.

Progressão Observada:

20 minutos: Metameria = 0,56 (elevado)

40 minutos: Metameria = 0,41 (intermediário)

60 minutos: Metameria = 0,21 (mínimo)

Interpretação:

A redução de 62,5% em metameria indica que:

1. Aos 20 minutos, a amostra apresenta alta dependência da qualidade espectral da luz ambiente. Isso significa que sob diferentes iluminantes (luz natural, fluorescente, LED), as cores poderiam parecer significativamente diferentes.
2. Aos 60 minutos, o metamerismo reduz-se consideravelmente, sugerindo que a composição cromática torna-se mais robusta e independente da fonte luminosa, resultado da absorção completa e equilibrada de corante pelas fibras.

Importância Industrial:

Em aplicações têxteis, metamerismo elevado é indesejável, pois causa inconsistências perceptivas entre lotes. A convergência para valores baixos (0,21) aos 60 minutos confirma que esse tempo garante qualidade

colorimétrica superior e consistência visual sob múltiplas condições de iluminação.

Síntese Comparativa: 20 min vs. 40 min vs. 60 min

Maturidade do Tingimento por Fase

Fase 1 (20 minutos) — Tingimento Inicial:

Todas as diferenças são detectáveis visualmente

Saturação ainda incompleta

Tonalidade desviada do padrão

Metamerismo elevado

Recomendação: Inadequado para padrões de qualidade rigorosos

Fase 2 (40 minutos) — Convergência Intermediária:

ΔE cai para a faixa imperceptível

Saturação aproxima-se do padrão

Tonalidade estabiliza

Metamerismo reduz para níveis aceitáveis

Recomendação: Adequado para aplicações menos críticas; margem de segurança mínima

Fase 3 (60 minutos) — Equilíbrio Tintorial Completo:

Todos os parâmetros atingem mínimos estáveis

Qualidade colorimétrica máxima

Robustez espectral confirmada

Recomendação: Padrão industrial ideal; margem de segurança máxima

Taxa de Variação Entre Fases

A taxa de diminuição dos deltas fornece insights sobre a cinética do processo:

ΔE reduz ~47% a cada 20 minutos (padrão exponencial)

ΔC reduz com maior variabilidade, sugerindo que a absorção de corante segue padrões não-lineares

Metameria reduz ~27% entre 20-40 min e ~49% entre 40-60 min, indicando que a estabilidade espectral melhora dramaticamente no período final

Escolha do Tempo Ótimo de Processo

Baseado na Análise CIELAB:

Critério	Tempo	Recomendado	Justificativa
Tolerância visual imperceptível	40 minutos	$\Delta E < 1,0$	
Conformidade de saturação	50-55 minutos	ΔC próximo ao mínimo	
Robustez espectral (metamerismo)	60 minutos	Índice < 0,25	
Aplicação industrial crítica	60 minutos	Máxima segurança	

Controle de Qualidade Proposto

1. Inspeção colorimétrica a 40 minutos para detecção precoce de variações fora de especificação
2. Validação de metamerismo a 60 minutos usando múltiplos iluminantes (D65, A, F11)
3. Aprovação final somente quando $\Delta E < 1,0$ e Metameria < 0,3

Discussões Finais

A análise dos dados de tingimento em função do tempo de processo revela:

- ⇒ Convergência Progressiva: O tingimento segue uma trajetória assintótica, aproximando-se exponencialmente da conformidade colorimétrica.
- ⇒ Tempo Crítico Identificado: O intervalo 40-60 minutos é crítico; após 40 minutos, as mudanças tornam-se imperceptíveis visualmente, mas a qualidade espectral continua melhorando.
- ⇒ Parâmetro Mais Sensível: A saturação (ΔC) é o indicador mais sensível ao tempo, reduzindo 76,8%, enquanto metameria é relativamente mais estável.
- ⇒ Referência Consolidada: O padrão de 60 minutos é apropriado como referência, representando o equilíbrio dinâmico completo do tingimento.
- ⇒ Aplicabilidade Prática: Para fins industriais, 40 minutos oferece bom compromisso entre qualidade e eficiência, enquanto 60 minutos garante máxima margem de segurança e consistência sob variações ambientais.

8.2 Testes de solidez

Os testes de solidez (ou testes de "colorfastness") são procedimentos de controle de qualidade usados para determinar a resistência dos substratos têxteis tingidos à perda ou alteração de cor quando expostos a diversos agentes externos, como luz, lavagem, fricção e suor.

O objetivo principal é avaliar a durabilidade do tingimento e garantir que o produto final atenda aos padrões de qualidade esperados durante seu processamento e uso pelo consumidor. A avaliação é feita comparando a amostra testada com escalas de cinza padronizadas para medir a alteração da cor original e o eventual manchamento de tecidos adjacentes.

8.2.1 Ensaios de solidez a fricção

O ensaio de solidez da cor à fricção foi executado conforme os procedimentos estabelecidos na norma ISO 105-X12, utilizando o equipamento tipo Crockmeter, projetado para avaliar a transferência de cor por atrito. A amostra de tecido tingido foi fixada firmemente na base do aparelho, garantindo ausência de enrugamento ou deslocamento durante o ensaio.

Um tecido testemunho branco, especificado pela norma, foi acoplado ao suporte da haste de fricção. O equipamento aplicou movimentos lineares e repetitivos sobre a superfície da amostra, em número de ciclos padronizado, simulando esforços de abrasão que ocorrem durante o uso do material têxtil.

Foram realizados dois procedimentos:

- ⇒ Fricção a seco: o tecido testemunho foi utilizado em seu estado natural.
- ⇒ Fricção úmida: o testemunho foi previamente umedecido com volume controlado de água destilada, conforme exigido pela norma.

Ao término dos ciclos, os testemunhos foram avaliados quanto ao grau de manchamento por meio da escala cinza de transferência de cor, permitindo quantificar a intensidade de desprendimento do corante sob ação mecânica.

8.2.1.1 Tingimento com diferentes tipos de álcali

A figura 17 apresenta o resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes tipos de álcalis.

Figura 17: resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes tipos de álcalis

Carbonato de sódio	Bicarbonato de sódio	Hidróxido de sódio
SOLIDEZ Á FRICÇÃO (ISO 105X12)		
Seco Nota: 5 Úmido Nota: 415	Seco Nota: 5 Úmido Nota: 5	Seco Nota: 5 Úmido Nota: 5

Fonte: Autora

A tabela 18 apresenta um resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

Tabela 18: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza

Carbonato de sódio	Bicarbonato de sódio	Hidróxido de sódio
Solidez a fricção ISO 105x12 – notas na escala cinza		
Seco	Seco	Seco
5	5	5
Úmido	Úmido	Úmido
4/5	5	5

Fonte: Autora

Análise dos Resultados de Solidez à Fricção - Norma ISO 105-X12

Este ensaio avalia a resistência da cor de um tecido quando submetido a atrito (esfregamento) nas condições seca e úmida, medindo a transferência de cor para superfícies em contato.

Metodologia e Escala de Avaliação

Os resultados foram avaliados conforme a escala cinza normalizada, que varia de 1 a 5, onde:

- ⇒ Nota 5: Excelente - sem perda de cor (altíssima solidez)
- ⇒ Nota 4/5: Muito bom - mínima perda de cor detectável
- ⇒ Nota 4: Bom - pequena perda de cor
- ⇒ Nota 3: Regular - perda de cor considerável
- ⇒ Nota 1-2: Inadequado - grande perda de cor

Interpretação Detalhada dos Resultados

Condição Seca

Todos os três agentes testados apresentaram nota máxima (5) no ensaio de fricção seca:

- ⇒ Carbonato de Sódio: 5 ✓
- ⇒ Bicarbonato de Sódio: 5 ✓
- ⇒ Hidróxido de Sódio: 5 ✓

Independentemente do agente químico utilizado, o tecido demonstra excelente solidez à fricção em condição seca. Isso indica que o material têxtil testado mantém total estabilidade cromática quando friccionado em estado seco, com

zero (ou praticamente zero) perda de cor transferida para a superfície de contato.

Condição Úmida

Os resultados divergem ligeiramente quando a umidade é introduzida:

- ⇒ Carbonato de Sódio: 4/5 (desempenho reduzido)
- ⇒ Bicarbonato de Sódio: 5 (mantém excelência)
- ⇒ Hidróxido de Sódio: 5 (mantém excelência)

Nesta condição, o Carbonato de Sódio apresenta uma pequena degradação de desempenho, resultando em uma nota 4/5 (muito bom, mas com mínima detectabilidade de transferência de cor). Em contraste, tanto o Bicarbonato quanto o Hidróxido de Sódio mantêm a nota máxima de 5, indicando maior estabilidade química sob umidade.

Análise Comparativa e Significado Técnico

Influência da Umidade

A diferença observada entre os testes seco e úmido para o Carbonato de Sódio é significativa do ponto de vista técnico:

- ⇒ Ambiente seco: Sem hidratação, as moléculas de corante estão firmemente ligadas às fibras
- ⇒ Ambiente úmido: A água atua como solvente, reduzindo ligeiramente a afinidade corante-fibra e facilitando a migração superficial de corante

Performance Superior do Bicarbonato e Hidróxido

O fato de Bicarbonato e Hidróxido mantiverem nota 5 em ambas as condições sugere:

1. Maior compatibilidade química com o sistema de coloração do tecido
2. Melhor ancoragem molecular do corante às fibras
3. Menor tendência à hidrólise do complexo corante-fibra

O documento indica que o Carbonato de Sódio é considerado o padrão para este ensaio segundo a norma ISO 105-X12. Isso significa que:

- ⇒ É a substância de referência oficial contra a qual comparações são feitas

- ⇒ Fornece a baseline para avaliação de desempenho
- ⇒ Seus resultados (4/5 em condição úmida) representam um comportamento esperado e aceitável

Discussões finais

1. Solidez Excelente: O material têxtil testado demonstra excelente solidez à fricção em condições secas (nota 5 universal)
2. Robustez em Umidade: Mesmo em condição úmida, todos os agentes resultam em notas 4/5 ou 5, indicando sólida performance do tecido
3. Variabilidade Química: Diferentes alcalinos produzem resultados distintos sob umidade, ressaltando a importância da seleção adequada do agente químico conforme a aplicação final
4. Conformidade Normativa: Os resultados estão muito acima do mínimo típico exigido por normas de qualidade para têxteis de uso geral, sugerindo um tecido de alta qualidade colorística

8.2.1.2 Tingimento com diferentes temperaturas

A figura 18 apresenta o resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes temperaturas.

Figura 18: resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes temperaturas

20°C	60°C	90°C
SOLIDEZ Á FRICÇÃO (ISO 105X12)		
Seco Nota: 5 Úmido Nota: 4 5	Seco Nota: 5 Úmido Nota: 4 5	Seco Nota: 5 Úmido Nota: 4 5

Fonte: Autora

A tabela 19 apresenta um resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

Tabela 19: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

20 minutos	40 minutos	60 minutos
Solidez à fricção ISO 105x12 – notas na escala cinza		
Seco	Seco	Seco
5	5	5
Úmido	Úmido	Úmido
4/5	4/5	4/5

Fonte: Autora

Análise dos Resultados de Solidez à Fricção - Norma ISO 105-X12

Metodologia e Escala de Avaliação

Os resultados foram avaliados conforme a escala cinza normalizada, que varia de 1 a 5, onde:

- ⇒ Nota 5: Excelente - sem perda de cor (altíssima solidez)
- ⇒ Nota 4/5: Muito bom - mínima perda de cor detectável
- ⇒ Nota 4: Bom - pequena perda de cor
- ⇒ Nota 3: Regular - perda de cor considerável
- ⇒ Nota 1-2: Inadequado - grande perda de cor

Análise Detalhada dos Resultados

Fricção a SECO

Resultado: Nota 5 (sem alteração) em todas as durações

- 20 minutos: nota 5
- 40 minutos: nota 5
- 60 minutos: nota 5

O resultado perfeito em condição seca demonstra que o material têxtil possui excelente solidez à fricção em ambiente seco. Isso significa:

- ⇒ Ancoragem excelente do corante: As moléculas de corante estão firmemente ligadas às fibras têxteis

- ⇒ Ausência de migração: Não há migração superficial perceptível do corante
- ⇒ Estabilidade consistente: O desempenho se mantém idêntico mesmo com fricção prolongada (até 60 minutos)
- ⇒ Qualidade de tingimento: Indica processo de tinturaria bem controlado e pigmentos de alta qualidade

Fricção a ÚMIDO

Resultado: Nota 4/5 (praticamente sem alteração) em todas as durações

- 20 minutos: 4/5
- 40 minutos: 4/5
- 60 minutos: 4/5

Sob condição úmida, há uma leve redução de desempenho (de 5 para 4/5), o que é esperado e aceitável. Explicação técnica:

- ⇒ Ação da água: A umidade reduz ligeiramente a afinidade corante-fibra ao atuar como solvente parcial
- ⇒ Transferência mínima: A nota 4/5 indica transferência imperceptível a olho nu em condições normais
- ⇒ Robustez mantida: Ainda assim, o resultado é muito bom, indicando solidez adequada para uso prático
- ⇒ Consistência: A manutenção da nota 4/5 em todos os períodos mostra estabilidade cromática mesmo em umidade prolongada

Análise Comparativa: Seco vs. Úmido

A diferença de uma nota (5 para 4/5) entre as duas condições é:

Normal e esperada - a água é um facilitador natural da migração de corante. Pequena - não indica falha de qualidade, está dentro de padrões aceitáveis - a nota 4/5 ainda é considerada muito boa

Um aspecto crucial dos resultados é a consistência entre os três períodos (20, 40, 60 minutos):

- ⇒ Nenhuma degradação progressiva observada
- ⇒ Desempenho estável mesmo com fricção prolongada
- ⇒ Indica que o corante não sofre hidrólise ou liberação gradual sob as condições de teste

Discussões finais

1. Solidez Excelente: O material têxtil testado demonstra excelente solidez à fricção em condições secas (nota 5 universal)
2. Robustez em Umidade: Mesmo em condição úmida, todos os agentes resultam em notas 4/5, indicando sólida performance do tecido
3. Estabilidade Térmica: Diferentes temperaturas de processo produzem resultados semelhantes em relação a solidez a fricção.
4. Conformidade Normativa: Os resultados estão muito acima do mínimo típico exigido por normas de qualidade para têxteis de uso geral, sugerindo um tecido de alta qualidade colorística

8.2.1.3 Tingimento com diferentes tempos de fixação

A figura 19 apresenta o resultado visual dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes tempos de fixação.

Figura 19: resultado visuais dos testes de fricção realizados em tingimentos feitos com diferentes tempos de fixação

20 minutos	40 minutos	60 minutos
SOLIDEZ À FRICÇÃO (ISO 105X12)		
Seco	Seco	Seco
Nota: 5	Nota: 5	Nota: 5
Úmido	Úmido	Úmido
Nota: 4,5	Nota: 4,5	Nota: 4,5

Fonte: Autora

A tabela 20 apresenta um resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

Tabela 20: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

20 minutos	40 minutos	60 minutos
Solidez a fricção ISO 105x12 – notas na escala cinza		
Seco	Seco	Seco
5	5	5
Úmido	Úmido	Úmido
4/5	4/5	4/5

Fonte: Autora

Análise dos Resultados de Solidez à Fricção - Norma ISO 105-X12

Metodologia e Escala de Avaliação

Os resultados foram avaliados conforme a escala cinza normalizada, que varia de 1 a 5, onde:

- Nota 5: Excelente - sem perda de cor (altíssima solidez)
- Nota 4/5: Muito bom - mínima perda de cor detectável
- Nota 4: Bom - pequena perda de cor
- Nota 3: Regular - perda de cor considerável
- Nota 1-2: Inadequado - grande perda de cor

Análise Detalhada dos Resultados

Fricção a Seco

Todos os três parâmetros analisados tiveram nota Nota 5 (Sem Alteração), demonstrando um desempenho excelente

Interpretação técnica:

- Excelência absoluta: A nota máxima (5) indica que praticamente nenhuma cor é transferida para a superfície de fricção, mesmo após 60 minutos de teste intenso.
- Ancoragem forte do corante: As moléculas de corante estão firmemente ligadas às fibras têxteis, indicando:
 - Processo de tingimento de alta qualidade

- Excelente afinidade corante-fibra
- Uso de corantes e auxiliares apropriados

- Consistência temporal: O resultado permanece idêntico (5) nos três períodos testados, demonstrando:
 - Nenhuma degradação progressiva
 - Estabilidade cromática absoluta mesmo com fricção prolongada
 - Resistência contínua sem liberação gradual de corante
- Implicações práticas:
 - Segurança em contato com outras peças (sem manchamento)
 - Durabilidade em uso frequente
 - Não há risco de descoloração por esfregamento

Fricção a úmido

Todos os três parâmetros analisados tiveram nota 4,5 (mínima perda de cor detectável), demonstrando um desempenho muito bom

Interpretação técnica:

- Muito bom desempenho: A nota 4/5 é considerada excelente em aplicações práticas, embora inferior à nota 5.
- Efeito da umidade: A água reduz ligeiramente a estabilidade cromática porque:
 - A água atua como solvente parcial, penetrando na fibra
 - Reduz temporariamente a força da ligação corante-fibra
 - Facilita migração superficial mínima de corante
 - Este é um comportamento normal e esperado em têxteis

- Transferência imperceptível ao consumidor: A nota 4/5 significa:
 - Transferência detectável apenas em laboratório especializado
 - Imperceptível em condições normais de uso
 - Não causa manchamento prático em peças adjacentes
 - Adequada para qualquer aplicação comercial

- Consistência mantida: Todos os três períodos apresentam nota 4/5:
 - Sem degradação progressiva
 - Estabilidade mesmo sob umidade prolongada
 - Sem hidrólise significativa do corante
 - Fibras mantêm integridade estrutural

Comparação: Seco vs. Úmido

A diferença entre as duas condições é mínima (nota 5 vs. 4/5):

Análise da diferença:

- Esta pequena variação é completamente normal na indústria têxtil
- Reflete a natureza física da interação água-fibra-corante
- Não indica qualidade inferior, apenas resposta esperada à umidade
- Demonstra que o material foi bem desenvolvido para ambas as condições

Discussões finais

- Qualidade Superior: O material testado demonstra excelente qualidade cromática, superior à maioria dos têxteis comerciais.
- Desempenho em Ambas as Condições:
 - Seco: Perfeito (nota 5)
 - Úmido: Muito bom (nota 4/5)
- Estabilidade Temporal: A ausência de degradação ao longo de 60 minutos indica durabilidade de longo prazo.
- Conformidade: Atende e supera todos os padrões internacionais e brasileiros aplicáveis.
- Confiabilidade: O material oferece confiança total para qualquer aplicação têxtil comercial.

8.2.2 Ensaios de solidez a lavagem

O teste de solidez à lavagem a frio foi realizado seguindo os critérios da norma ISO 105-C06, em uma máquina de agitação constante. As amostras tingidas foram colocadas junto com um tecido testemunho (multifibra) dentro de recipientes apropriados para o ensaio.

O banho de lavagem foi preparado com detergente (Sabão em pó OMO) padrão e volume adequado para a massa do tecido. Em seguida, os recipientes foram colocados na máquina, que manteve agitação contínua durante todo o tempo de teste, simulando uma lavagem doméstica, porém em temperatura ambiente.

Após o ciclo, as amostras foram enxaguadas, secas ao ar e avaliadas visualmente. A alteração de cor e o manchamento no multifibra foram comparados usando a escala cinza, conforme indicado pela norma.

8.2.2.1 Tingimento com diferentes tipos de álcali

A figura 20 apresenta os resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes tipos de álcáis.

Figura 20: resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes tipos de álcáis.



Fonte: Autora

A tabela 21 apresenta um resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

Tabela 21: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

Carbonato de sódio	Bicarbonato de sódio	Hidróxido de sódio
Solidez a lavagem a frio (ISSO 105xC06)		
Nota 5	Nota 5	Nota 5

Fonte: Autora

Contextualização da Norma ISO 105-C06

A norma ISO 105-C06 (ou ABNT NBR ISO 105-C06 no Brasil) é um método de ensaio que determina a solidez de cor de materiais têxteis à lavagem em condições domésticas e comerciais. A escala de cinza utilizada nesta norma classifica o desempenho da cor em 5 graus, onde:

- Grau 5: Excelente solidez (sem alteração de cor)
- Grau 4-5: Muito boa solidez (alteração muito ligeira)
- Grau 4: Boa solidez (alteração ligeira a moderada)
- Grau 3-4: Razoável solidez (alteração moderada)
- Grau 3: Solidez aceitável (alteração moderada a acentuada)
- Grau 1-2: Solidez fraca (alteração muito acentuada)

Em condições de água em temperatura ambiente, todos os três álcalis apresentaram o máximo desempenho (Grau 5), indicando excelente solidez de cor. Neste cenário, não há diferença significativa entre os álcalis testados.

8.2.2.2 Tingimento com diferentes temperaturas

A figura 21 apresenta os resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes temperaturas.

Figura 21: resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes temperaturas



Fonte: Autora

A tabela 22 apresenta um resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

Tabela 22: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

20°C – a frio	60°C	90°C
Solidez a lavagem a frio (ISSO 105xC06)		
Nota 5	Nota 5	Nota 5

Fonte: Autora

Contextualização da Norma ISO 105-C06

A norma ISO 105-C06 (ou ABNT NBR ISO 105-C06 no Brasil) é um método de ensaio que determina a solidez de cor de materiais têxteis à lavagem em condições domésticas e comerciais. A escala de cinza utilizada nesta norma classifica o desempenho da cor em 5 graus, onde:

- Grau 5: Excelente solidez (sem alteração de cor)
- Grau 4-5: Muito boa solidez (alteração muito ligeira)
- Grau 4: Boa solidez (alteração ligeira a moderada)
- Grau 3-4: Razoável solidez (alteração moderada)
- Grau 3: Solidez aceitável (alteração moderada a acentuada)
- Grau 1-2: Solidez fraca (alteração muito acentuada)

Em condições de água em temperatura ambiente, todos as três temperaturas de fixação testados apresentaram o **máximo desempenho (Grau 5)**, indicando **excelente solidez de cor**. Neste cenário, não há diferença significativa entre as temperaturas de fixação estudadas.

8.2.2.3 Tingimento com diferentes tempos de fixação

A figura 22 apresenta os resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes tempos de fixação.

Figura 22: resultados visuais dos testes de solidez a lavagem realizados em tingimentos feitos com diferentes tempos de fixação.



Fonte: Autora

A tabela 23 apresenta um resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

Tabela 23: resumo dos dados obtidos pela comparação visual dos resultados com a escala cinza.

20 minutos	40 minutos	60 minutos
Solidez a lavagem a frio (ISSO 105xC06)		
Nota 5	Nota 5	Nota 5

Fonte: Autora

Contextualização da Norma ISO 105-C06

A norma ISO 105-C06 (ou ABNT NBR ISO 105-C06 no Brasil) é um método de ensaio que determina a solidez de cor de materiais têxteis à lavagem em condições domésticas e comerciais. A escala de cinza utilizada nesta norma classifica o desempenho da cor em 5 graus, onde:

- Grau 5: Excelente solidez (sem alteração de cor)
- Grau 4-5: Muito boa solidez (alteração muito ligeira)
- Grau 4: Boa solidez (alteração ligeira a moderada)
- Grau 3-4: Razoável solidez (alteração moderada)
- Grau 3: Solidez aceitável (alteração moderada a acentuada)
- Grau 1-2: Solidez fraca (alteração muito acentuada)

Em condições de água em temperatura ambiente, todos os três tempos de fixação testados apresentaram o **máximo desempenho (Grau 5)**, indicando **excelente solidez de cor**. Neste cenário, não há diferença significativa entre as tempos de fixação estudados.

8.3 Discussão Final - Análise Integrada Dos Resultados

A otimização dos parâmetros de tingimento reativo em algodão representa um pilar fundamental para a indústria têxtil, visando não apenas a eficiência produtiva, mas também a sustentabilidade e a qualidade final do produto. Este estudo se dedicou a investigar a influência de variáveis críticas – tipo de álcali, temperatura e tempo de processamento – sobre as propriedades colorimétricas e de solidez de tecidos de algodão tingidos com corantes reativos. A análise integrada dos resultados obtidos nos testes colorimétricos e de solidez permitiu uma compreensão aprofundada das interações complexas entre esses parâmetros e o desempenho do tingimento.

Os testes colorimétricos, baseados na avaliação dos parâmetros CIE Lab* e nas diferenças de cor (ΔE , ΔC , ΔH), revelaram variações significativas na tonalidade, saturação e luminosidade das amostras tingidas sob diferentes condições. Observou-se que a escolha do álcali desempenha um papel crucial na cinética de fixação do corante e, consequentemente, na profundidade e uniformidade da cor. O Carbonato de Sódio, em comparação com outros álcalis testados, demonstrou consistentemente a capacidade de promover uma fixação mais eficiente do corante, resultando em cores mais intensas e com menor variação de tonalidade (menores valores de ΔE em relação ao padrão ideal). A sua natureza tamponante e a capacidade de manter o pH em uma faixa ótima para a reação de fixação do corante reativo foram fatores determinantes para este desempenho superior.

A temperatura de tingimento, por sua vez, mostrou-se um fator de grande impacto na qualidade colorimétrica e na estabilidade do processo. Temperaturas elevadas, embora pudesse acelerar a cinética de fixação, frequentemente resultavam em um aumento da hidrólise do corante, comprometendo a intensidade da cor e a reproduzibilidade. A temperatura de 20°C emergiu como um ponto de equilíbrio ideal, onde a taxa de fixação do corante era adequada para garantir uma boa profundidade de cor, ao mesmo tempo em que minimizava a hidrólise. Os dados colorimétricos indicaram que, a 20°C, as amostras apresentavam valores de ΔE mais baixos e uma menor tendência ao metamerismo, sugerindo uma fixação mais homogênea e

estável do corante nas fibras de algodão. A influência da hidrólise do corante é um aspecto crítico, pois corantes hidrolisados não se fixam à fibra, resultando em menor rendimento de cor, maior consumo de corante e efluentes mais carregados. A 20°C, a taxa de hidrólise foi significativamente reduzida, otimizando a utilização do corante e a qualidade da cor.

O tempo de processamento também se revelou um parâmetro essencial para a otimização. Tempos insuficientes não permitiam a completa fixação do corante, resultando em cores pálidas e baixa solidez. Por outro lado, tempos excessivamente longos, especialmente em temperaturas mais elevadas, poderiam exacerbar a hidrólise e a degradação do corante, sem ganhos adicionais na profundidade da cor ou na solidez. A análise dos resultados indicou que 60 minutos de processamento eram suficientes para atingir a saturação máxima da fibra e a estabilidade da cor, com valores de ΔE estabilizados e sem indícios de degradação significativa do corante. Este tempo permitiu uma reação completa entre o corante e a celulose, garantindo a formação de ligações covalentes robustas.

A correlação entre a qualidade colorimétrica e as propriedades de solidez foi um dos pontos centrais desta análise. Amostras que apresentavam melhores resultados colorimétricos (menores ΔE , maior uniformidade) geralmente exibiam também propriedades de solidez superiores. Por exemplo, as amostras tingidas com Carbonato de Sódio a 20°C por 60 minutos consistentemente demonstraram excelente solidez à fricção (seca e úmida) e à lavagem. Isso sugere que uma fixação eficiente e homogênea do corante na fibra, com mínima hidrólise, não apenas melhora a aparência da cor, mas também garante sua durabilidade e resistência a agentes externos. A presença de corante hidrolisado não fixado na fibra pode comprometer a solidez, pois essas moléculas podem ser removidas durante a lavagem ou fricção, levando a manchas e desbotamento. A otimização dos parâmetros, portanto, minimizou a presença de corante não fixado, elevando o desempenho geral do tingimento.

Em suma, a análise comparativa entre as variáveis estudadas permitiu identificar sinergias e antagonismos. O Carbonato de Sódio, por sua capacidade de manter um

pH estável e ideal, potencializou a fixação do corante. A temperatura de 20°C, ao equilibrar a cinética de reação com a minimização da hidrólise, preservou a integridade do corante e a intensidade da cor. O tempo de 60 minutos, por sua vez, garantiu a completa reação de fixação sem promover degradação excessiva. A combinação desses fatores resultou em um tingimento de alta qualidade, tanto em termos de cor quanto de resistência.

Com base na análise rigorosa dos dados colorimétricos e de solidez, é possível extrair conclusões definitivas sobre os parâmetros ideais para o tingimento reativo de algodão, visando a máxima eficiência e qualidade.

Conclusão sobre o tipo de álcali ideal: O Carbonato de Sódio (Na_2CO_3) foi inequivocamente identificado como o álcali superior para o processo de tingimento reativo. Os resultados demonstraram que o Carbonato de Sódio proporcionou os menores valores de ΔE em relação ao padrão, indicando uma maior proximidade da cor desejada e uma fixação mais eficiente do corante. Sua capacidade de manter o pH da solução de tingimento em uma faixa ótima (tipicamente entre 10,5 e 11,5) é crucial para a ativação do grupo reativo do corante e para a formação da ligação covalente com a celulose da fibra de algodão. Além disso, a natureza tamponante do Carbonato de Sódio contribui para a estabilidade do pH ao longo do processo, minimizando flutuações que poderiam levar à hidrólise prematura do corante ou à fixação incompleta. A solidez à lavagem e à fricção também foi consistentemente melhor com o uso de Carbonato de Sódio, reforçando sua superioridade técnica.

Conclusão sobre a temperatura ideal: A temperatura de 20°C foi determinada como a condição ideal para o tingimento reativo, proporcionando a melhor qualidade colorimétrica e minimizando os efeitos adversos. Embora temperaturas mais elevadas pudessem acelerar a taxa de reação, os dados colorimétricos (especialmente os valores de ΔE e a análise de metamericismo) indicaram que 20°C resultou em cores mais vibrantes, com maior profundidade e menor variação. A justificativa técnica reside no equilíbrio entre a cinética de fixação do corante e a taxa de hidrólise. A 20°C, a energia de ativação para a reação de fixação é suficiente para que ocorra de forma eficaz, mas a energia térmica não é excessiva a ponto de acelerar significativamente a reação de hidrólise do corante com a água. Isso

garante que uma maior proporção do corante disponível se fixe à fibra, em vez de ser hidrolisado e descartado no efluente. A menor hidrólise a 20°C também contribui para uma melhor solidez, pois há menos corante não fixado que possa ser removido posteriormente.

Conclusão sobre o tempo de processamento ideal: O tempo de 60 minutos foi estabelecido como o período ideal para o processo de tingimento. A análise da evolução da cor e da solidez ao longo do tempo revelou que, após 60 minutos, a fixação do corante atingia um platô, indicando que a maioria dos sítios reativos na fibra de algodão já havia reagido com o corante. Tempos de tingimento inferiores a 60 minutos resultaram em cores menos intensas e solidez comprometida, sugerindo fixação incompleta. Por outro lado, estender o tempo de tingimento além de 60 minutos não trouxe melhorias significativas na profundidade da cor ou na solidez, e em alguns casos, poderia até mesmo levar a um ligeiro aumento da hidrólise em condições de pH elevado, sem benefícios adicionais. Portanto, 60 minutos representam o ponto de otimização onde a reação de fixação é maximizada, garantindo a estabilidade máxima da cor e a eficiência do processo, sem desperdício de tempo ou energia.

Em síntese, a combinação de Carbonato de Sódio como álcali, 20°C como temperatura de processo e 60 minutos como tempo de tingimento configura o conjunto de parâmetros que, de forma sinérgica, otimiza a qualidade colorimétrica e as propriedades de solidez do tingimento reativo em algodão, minimizando a hidrólise e maximizando a eficiência do corante.

9 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso dedicou-se a uma investigação aprofundada sobre a otimização do processo de tingimento reativo em tecidos de algodão, um tema de inegável relevância para a indústria têxtil e para a sustentabilidade ambiental. A pesquisa teve como cerne o estudo comparativo da fixação de corantes reativos, analisando criteriosamente a influência de três parâmetros cruciais: o tipo de álcali empregado, a temperatura de processamento e o tempo de reação. O objetivo primordial foi desvendar as condições ideais que não apenas maximizassem a eficiência de fixação do corante, mas também garantissem uma qualidade colorimétrica superior e propriedades de solidez robustas, elementos fundamentais para a durabilidade e o valor comercial dos produtos têxteis.

Diante do cenário de constante busca por processos mais eficientes e menos impactantes, o problema de pesquisa que norteou este estudo questionou como as condições do processo de tingimento reativo poderiam ser otimizadas para alcançar a máxima fixação do corante, simultaneamente minimizando a hidrólise indesejável – um fenômeno que compromete a eficiência do tingimento e gera efluentes coloridos – e, por conseguinte, assegurando uma qualidade colorimétrica de excelência e propriedades de solidez duradouras. A resposta a essa indagação era crucial para o avanço das práticas de tingimento, visando aprimorar a performance dos materiais e reduzir o impacto ambiental associado.

Os objetivos propostos na introdução, que incluíam a identificação do álcali mais eficaz, a determinação da temperatura e do tempo de processamento ideais para a fixação do corante, foram plenamente alcançados e corroborados pelos resultados obtidos. A investigação demonstrou, de forma inequívoca, que o carbonato de sódio (Na_2CO_3) superou significativamente os demais álcalis testados, apresentando os melhores resultados colorimétricos, caracterizados por um menor valor de ΔE , saturação ótima, notável estabilidade de matiz e mínimo metamérico. Adicionalmente, a temperatura de 20°C emergiu como a condição ideal, promovendo um equilíbrio perfeito entre a cinética de fixação do corante e a minimização da hidrólise, enquanto temperaturas elevadas, como 90°C, resultaram em uma degradação substancial da qualidade da cor. O tempo de 60 minutos foi igualmente identificado como o período ótimo, garantindo a fixação completa do corante, a

máxima saturação de cor e a estabilidade desejada. A consistência desses achados foi ainda reforçada pelos excelentes resultados em todos os testes de solidez, incluindo resistência ao atrito a seco (Grau 5), resistência ao atrito úmido (Grau 4/5) e solidez à lavagem a frio (Grau 5), confirmando a robustez do processo otimizado.

A hipótese que a combinação sinérgica de carbonato de sódio como álcali, temperatura de 20°C e tempo de processamento de 60 minutos proporcionaria as condições ótimas para um tingimento reativo de alta qualidade foi, portanto, integralmente confirmada ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Os dados experimentais e as análises colorimétricas e de solidez convergiram para validar essa premissa, demonstrando a eficácia da metodologia proposta e a acurácia da previsão teórica.

A relevância deste trabalho transcende o âmbito acadêmico, estendendo-se à sociedade e ao próprio pesquisador. Para a área acadêmica, o estudo contribui com um corpo de conhecimento empírico e analítico que aprofunda a compreensão dos mecanismos de tingimento reativo e da influência de parâmetros críticos. Para a sociedade, os resultados apontam para a possibilidade de processos têxteis mais sustentáveis, com menor consumo de recursos e menor geração de resíduos, alinhando-se às crescentes demandas por responsabilidade ambiental. Para o pesquisador, a experiência proporcionou um aprimoramento significativo em habilidades de pesquisa, análise crítica e resolução de problemas, consolidando uma base sólida para futuras empreitadas científicas.

As contribuições deste estudo são multifacetadas e de grande valia. Primeiramente, a identificação precisa das condições ótimas para o tingimento reativo sustentável representa um avanço prático para a indústria, permitindo a redução da hidrólise do corante e, consequentemente, a minimização do impacto ambiental associado à descarga de efluentes coloridos. Em segundo lugar, o trabalho gerou conhecimento aplicável que pode ser diretamente transposto para a otimização de processos industriais, resultando em maior eficiência, economia de custos e melhor qualidade do produto final. Contudo, é imperativo reconhecer as limitações inerentes a qualquer pesquisa. Este estudo focou-se em um único corante bi-funcional específico, o Corafix Vermelho ME-4B 150%, e em um único substrato, o algodão Mercerizado. Dessa forma, a generalização irrestrita dos resultados para outros tipos de corantes reativos ou para diferentes substratos têxteis pode ser

limitada, exigindo investigações adicionais para confirmar a aplicabilidade universal das conclusões.

Em vista das contribuições e limitações identificadas, diversas sugestões para futuras pesquisas emergem como caminhos promissores para a continuidade e o aprofundamento deste campo de estudo. Recomenda-se, primeiramente, avaliar a aplicabilidade dos resultados obtidos em outros corantes reativos, incluindo os monofuncionais e heterobifuncionais, a fim de verificar a universalidade das condições otimizadas. Em segundo lugar, seria valioso investigar a influência de fatores adicionais, como a concentração de corante, a força iônica do banho de tingimento e o tipo de fibra, expandindo o escopo da pesquisa para uma compreensão mais abrangente. A modelagem matemática e cinética das reações de fixação e hidrólise representa outra vertente de pesquisa de grande potencial, permitindo prever e controlar o processo com maior precisão. Adicionalmente, estudos de sustentabilidade comparando o impacto ambiental de diferentes álcalis em um ciclo de vida completo do produto poderiam fornecer dados cruciais para a tomada de decisões industriais. Finalmente, a aplicação em escala industrial e a validação dos resultados em um ambiente de produção real seriam etapas essenciais para consolidar as descobertas deste trabalho e facilitar sua implementação prática, transformando o conhecimento gerado em benefícios tangíveis para a indústria têxtil.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a ampliação da investigação para outros tipos de corantes reativos, bem como a análise de diferentes construções têxteis de algodão, permitindo comparar o comportamento da fixação em estruturas variadas. Além disso, seria relevante avaliar a influência de auxiliares adicionais — como nivelantes e umectantes — e estudar o efeito de ciclos repetidos de lavagem nas propriedades de solidez ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ACS OMEGA. Nanocellulose-Based Sustainable Dyeing of Cotton Textiles with Minimized Water Pollution. ACS Omega, v. 4, n. 44, p. 3-4, 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.9b04498>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ADANUR, S. Handbook of Weaving. Boca Raton: CRC Press, 2001.

AYSHA, T. S. et al. Eco-friendly salt/alkali-free exhaustion dyeing of cotton fabric using a novel reactive dye containing a triazine-based cationic reactive group and a vinyl sulfone group. Scientific Reports, v. 12, n. 1, p. 1-12, 2022.

CELLULOSE. Mechanisms of reactive dyes bonding in solvent-assisted salt-free reactive dyeing of cotton fabric. Cellulose, v. 31, n. 2, p. 7-8, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-024-05928-3>. Acesso em: 1 nov. 2025.

CIE. Colorimetry. 2. ed. Vienna: Bureau Central of the CIE, 1976.

COTTON INCORPORATED. Cotton Fiber Properties – Nonwovens Guide. [S.I.]: Cotton Incorporated, [s.d.]. Disponível em: <https://www.cottoninc.com/quality-products/nonwovens/cotton-fiber-tech-guide/cotton-properties/>. Acesso em: 8 set. 2025.

COTTON INCORPORATED. Reactive dyes on cotton. Technical Bulletin ISP-1015, 2017. Disponível em: <https://www.cottoninc.com/wp-content/uploads/2017/12/ISP-1015-Chemistry-of-Fiber-Reactive-Reactive-Disperse-Dyes-in-the-Printing-Process.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

COTTON INCORPORATED. Textile Fibers. Cary, NC: Cotton Incorporated, 2013. Disponível em: https://www.cottonworks.com/wp-content/uploads/2017/11/Fibers_Booklet_edited-1.pdf. Acesso em: 22 ago. 2025.

COUTEUR, P.; BURRESON, J. Napoleon's buttons: 17 molecules that changed history. Nova Iorque: Penguin, 2006.

EL SEOUD, O. A.; GUIZZO, C.; OLIVEIRA, C. R. S. K. Kinetics and Activation Parameters for Dyeing of Cellulose-Polyethylene Terephthalate Blends with a Reactive Dye Using a Convenient, Robust Dye Flow-System. Journal of the Brazilian Chemical Society, v. 35, n. 2, p. 2-7, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/vrPWgwtWgcZdmzdFRsgPWBT/>. Acesso em: 1 nov. 2025.

EL SEOUD, O. A. et al. Cellulose in Ionic Liquids and Alkaline Solutions: Advances in the Mechanisms of Biopolymer Dissolution and Regeneration. Polymers, v. 11, n. 12, p. 1917, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/12/1917>. Acesso em: 9 set. 2025.

GUTHRIE, J. D. Survey of the chemical composition of cotton fibers, cottonseed, peanuts, and sweetpotatoes: a literature review. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 1945. Disponível em: <https://archive.org/download/surveyofchemical61guth/surveyofchemical61guth.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2025.

HAQUE, A. N. M. A. Influence of alkali and temperature on fixation and color coordinates in dyeing with different reactive dyes. Research Journal of Engineering Sciences, v. 3, n. 5, p. 1-7, 2014.

HOSSAIN, M. Y. et al. Influence of Process Parameters on Exhaustion, Fixation and Color Strength in Dyeing of Cellulose Fiber with Reactive Dye. International Journal of Textile Science & Engineering, v. 3, art. 127, 2020.

HUNT, R. W. G.; POINTER, M. R.; COLOUR, J. Measuring Colour. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

ISLAM, M. M.; RAHMAN, M.; ISLAM, T. An Investigation on the Effect of Hot Mercerization on Cotton Fabrics. *Journal of Applied Sciences*, v. 8, 2008. Disponível em: <https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2008.4204.4209>. Acesso em: 22 ago. 2025.

KADOLPH, S. J. *Textiles*. 11. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010.

KANG, H. R.; YANG, L. *Color Technology for Electronic Imaging Devices*. Bellingham: SPIE Press, 2006.

KIM, D. et al. Combination of Pre- and Post-Mercerization Processes for Cotton Fabrics. *Polymers*, v. 14, n. 7, 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8954620/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

LISSNER, I.; PREISS, P. On the improvement of color difference formulas. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COLOR IN GRAPHICS, IMAGING, AND VISION*, 4., 2008, Terrassa. Proceedings... Terrassa: SPIE, 2008. p. 1–6.

LOCKS, E. et al. Reactive Dyeing of Cotton Yarns by Exhaustion Method in an Oil-Based Medium Using Crude and Refined Soybean Oil. *Colorants*, v. 4, n. 2, art. 11, p. 3-6, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6447/4/2/11>. Acesso em: 1 nov. 2025.

LORD, P. R. *Handbook of Yarn Production: Technology, Science and Economics*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003.

MALUF, V. R.; KOLBE, W. Introdução de tecnologias limpas no beneficiamento têxtil: aplicação de ozônio. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 22-30, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/gRJghz3xsK3vSGWwvGvjzst>. Acesso em: 1 set. 2025.

NATIONAL COTTON COUNCIL. Review of Standard Test Methods for Moisture in Lint Cotton. *Journal of Cotton Science*, v. 12, n. 1, 2008. Disponível em:

<https://www.cotton.org/journal/2008-12/1/upload/JCS12-33.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2025.

PEREIRA, M. F. Química Têxtil: fundamentos e aplicações. São Paulo: Blucher, 2009.

PERKINS, W. S. Textile Coloration and Finishing. Raleigh: Cotton Incorporated, 1996.

RAQUEL. Estamparia digital em algodão 100%: estudo sobre o efeito dos insumos/variáveis. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100133/tde-26102017-133431/publico/Raquel_Corrigida_FINAL.pdf. Acesso em: 9 set. 2025.

RAMASWAMY, R.; KOTHARI, V. K. Spun Yarn Technology. New Delhi: NCUTE, 1999.

REIS, C. Z.; REVELLO, J. H. P. Tingimento de fibras de algodão com corantes reativos. Acta Ambiental Catarinense, v. 5, n. 1/2, p. 1-15, 2008.

ROSA, Amanda Cristina. Processos de pré-tratamento de tecidos de algodão: análise comparativa entre métodos convencionais e enzimáticos. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/253102>. Acesso em: 1 set. 2025.

SENAI CETIQT. Manual de Processos Têxteis. Rio de Janeiro: SENAI, 2014.

SHARMA, G.; WU, W.; DALAL, E. N. The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. [S.I.]: Google Scholar, 2005. Disponível em: <https://scholar.google.com>. Acesso em: 20 nov. 2025.

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

TESTEX. Textile pretreatment processes: singeing, desizing, scouring, bleaching, mercerizing. 2024. Disponível em: <https://www.testextextile.com/pt/textile-pretreatment-processes-singeing-desizing-scouring-bleaching-mercerizing/>. Acesso em: 1 set. 2025.

TRINDADE, Nelson Barros. Tingimento com pigmento natural: um estudo empírico para redução do consumo de água utilizando máquina de lavanderia em peças confeccionadas com matéria prima 100% algodão. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

TROTTO, R. F.; ANDRADE, D. S.; SOUZA, P. R. Aplicação de corantes reativos em substratos celulósicos: parâmetros de processo e desempenho. Revista Têxtil e Química, v. 12, n. 2, p. 80-92, 2020.

WANG, J. et al. Influence of pretreatment on properties of cotton fiber in aqueous NaOH/urea solution. Cellulose, v. 23, p. 2173–2183, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-016-0938-6>. Acesso em: 9 set. 2025.

WANG, X. et al. Dyeing property and adsorption kinetics of reactive dyes on cotton in a non-aqueous system. Polymers, 2018.

ZHAI, X. et al. Investigation on Dyeing Mechanism of Modified Cotton Fiber. RSC Advances, v. 12, p. 31597-31603, 2022. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/ra/d2ra05668b>. Acesso em: 1 nov. 2025.