

MELHORIAS NO BIOPOLIMENTO: DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA UMA LAVANDERIA INDUSTRIAL

*IMPROVEMENTS IN BIOPOLISHING: CHALLENGES AND SOLUTIONS FOR AN
INDUSTRIAL LAUNDRY*

Francisco Odisi ¹

Vivien Rossbach ²

Enéias Maffezzolli ³

Junelene Costodio Pruner ⁴

Elizabeth Larissa Debatin ⁵

RESUMO: A presente pesquisa investiga o processo de biopolimento, utilizado no tratamento de *pilling* em tecidos, um problema que causa a formação de aglomerados de fibras na superfície, prejudicando a aparência e a durabilidade dos tecidos. A justificativa para o estudo está na importância de otimizar o biopolimento para aumentar a qualidade dos tecidos. Este estudo foi realizado com base em amostras de tecido coletadas em uma lavanderia industrial. Análises de microscopia revelaram que o processo atualmente utilizado pela empresa não é totalmente eficaz na eliminação do *pilling*. O estudo propõe soluções para otimizar o processo, incluindo ajustes nos parâmetros de aplicação da enzima, como pH, temperatura e concentração, além da avaliação de novas enzimas. Conclui-se que a otimização do biopolimento pode resultar em tecidos com menor propensão ao *pilling* e melhor qualidade.

Palavras-chave: indústria têxtil; lavanderia industrial; biopolimento; enzimas; *pilling*.

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno de *pilling* em materiais têxteis, caracterizado pela formação de aglomerados superficiais de fibras curtas e soltas, constitui um desafio significativo para a indústria têxtil (Gonçalves, 2022). Este problema compromete a estética e a durabilidade dos produtos, exercendo um impacto negativo na satisfação do consumidor. Entre as fibras naturais utilizadas no setor, o algodão destaca-se por suas propriedades de conforto e versatilidade. No entanto, sua estrutura fibrosa o torna particularmente suscetível ao *pilling*, depreciando o valor agregado dos artigos têxteis.

¹ Mestre em Eng. Química. Docente - UNIFEBE. *E-mail:* francisco@unifebe.edu.br

² Doutora em Eng. Química. Docente - UNIFEBE. *E-mail:* vivien.rossbach@unifebe.edu.br

³ Mestre em Eng. Química. Docente - UNIFEBE. *E-mail:* eneias.maffezzolli@unifebe.edu.br

⁴ Doutora em Eng. de Produção. Docente - UNIFEBE. *E-mail:* junelene.pruner@unifebe.edu.br

⁵ Mestranda em Eng. Química. Docente - UNIFEBE. *E-mail:* elizabete.debatin@unifebe.edu.br

Nesse contexto, a investigação e a implementação de estratégias eficazes para mitigar o *pilling* em tecidos de algodão são uma área de pesquisa de considerável relevância científica e econômica. O biopolimento enzimático surge como uma alternativa tecnológica promissora, baseada na ação catalítica de enzimas celulases para a hidrólise controlada das microfibrilas superficiais das fibras celulósicas (Andreas, 2001). Este processo apresenta-se como uma abordagem mais sustentável em relação aos métodos convencionais, visando melhorar o toque superficial dos tecidos e reduzir a propensão à formação de *pilling*.

O presente estudo tem como objetivo analisar o processo de biopolimento em uma lavanderia industrial, identificando as limitações de sua aplicação prática e propondo soluções baseadas em evidências científicas e técnicas para otimizar sua eficácia no tratamento do *pilling* em tecidos de algodão. A análise considera as etapas do processo produtivo, as dificuldades observadas e a avaliação da eficácia do biopolimento por meio de análises microscópicas, confrontando os resultados com a literatura especializada para desenvolver melhorias aplicáveis ao contexto industrial investigado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PILLING: DEFINIÇÃO E MECANISMO DE FORMAÇÃO

O *pilling*, um processo que compromete a estética têxtil, manifesta-se por meio da formação de aglomerados esféricos ou nódulos de fibras na superfície do tecido, conferindo-lhe uma aparência envelhecida e pouco atraente. Esse fenômeno é primariamente induzido pela fricção e pelos atritos constantes durante o manuseio e as etapas de lavagem, o que inevitavelmente leva à liberação de fibras curtas que compõem a tessitura do fio, as quais, ao se entrelaçarem, formam os característicos "bolinhos" ou pilosidades. A suscetibilidade e a intensidade do *pilling* são intrinsecamente influenciadas por uma variedade de elementos cruciais, abrangendo a natureza específica da fibra utilizada, o método de construção do tecido que define sua integridade estrutural, os tratamentos e acabamentos superficiais aplicados para modificar suas propriedades, e, crucialmente, as condições de uso diário e os procedimentos de manutenção adotados pelo consumidor, que podem exacerbar ou mitigar o problema. Em tecidos de algodão, por exemplo, a tendência inerente das fibras celulósicas a se desprenderem da matriz têxtil representa um fator significativo que aumenta a probabilidade de ocorrência do *pilling*, demandando cuidados específicos para preservar a qualidade do material (Gonçalves, 2022).

2.2 BIOPOLIMENTO ENZIMÁTICO: PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES

O biopolimento enzimático representa uma abordagem inovadora e refinada no acabamento têxtil, utilizando o poder catalítico de enzimas, notavelmente as celulases, para transformar a textura de tecidos compostos por fibras celulósicas, com destaque para o algodão. A ação precisa das celulases reside na hidrólise seletiva das ligações glicosídicas que estruturam as longas cadeias de celulose, orquestrando a remoção controlada e gradual das microfibrilas superficiais soltas e das extremidades de fibra diminutas que naturalmente se projetam da estrutura do fio, conferindo uma aspereza indesejada (Andreaus, 2001). Esse tratamento enzimático resulta em tecidos que exibem uma superfície notavelmente mais suave e homogênea ao toque e visualmente, o que, por sua vez, implica uma diminuição considerável na propensão inerente dessas fibras à formação do incômodo pilling, prolongando a vida útil e a estética das peças. Adicionalmente, o biopolimento é amplamente valorizado como uma opção de acabamento têxtil que se alinha com princípios de sustentabilidade ambiental, apresentando-se como uma alternativa ecologicamente consciente aos métodos químicos agressivos e aos processos mecânicos tradicionais, principalmente devido à sua operação eficiente em condições de temperatura e pH mais amenas, além do uso de enzimas, que são catalisadores biológicos intrinsecamente biodegradáveis e menos impactantes ao meio ambiente (Gonçalves, 2022).

2.3 CONTEXTO INDUSTRIAL

A imersão no ambiente operacional de uma lavanderia industrial revelou uma visão aplicada e valiosa do processo de biopolimento em tecidos de algodão, permitindo um contato direto com os desafios reais da indústria têxtil. A constatação das dificuldades enfrentadas pela empresa parceira durante a crucial etapa de biopolimento, especialmente no que tange à obtenção de resultados ótimos na eliminação das indesejáveis pilosidades, despertou um interesse investigativo na busca por soluções mais eficazes e inovadoras. As detalhadas observações realizadas *in loco* proporcionaram uma compreensão aprofundada de que o protocolo de biopolimento atualmente implementado não alcança uma eficácia plena na prevenção do pilling, suscitando importantes questionamentos sobre a necessidade de refinar os parâmetros operacionais do processo ou de explorar a integração de estratégias complementares para mitigar completamente esse problema recorrente na indústria têxtil.

2.4 ANÁLISE MICROSCÓPICA DE AMOSTRAS TÊXTEIS

As análises de microscopia conduzidas nas amostras de tecidos submetidos ao processo de biopolimento em uso evidenciaram a permanência de fibras superficiais não totalmente removidas. Essa constatação microscópica oferece uma explicação visual para a eficácia apenas parcial do método de biopolimento atualmente implementado na lavanderia industrial. A presença dessas fibras soltas na superfície do tecido é um indicativo direto de que o processo, embora exerça algum efeito, não consegue eliminar completamente as microfibras responsáveis pela formação do pilling.

Essas observações laboratoriais reforçam as dificuldades práticas previamente reportadas pela empresa em alcançar um controle verdadeiramente satisfatório sobre a ocorrência do pilling nos tecidos de algodão. A correlação entre a persistência de fibras superficiais observada por microscópico e a formação de "bolinhas" relatada pela lavanderia sugere fortemente a necessidade de uma revisão aprofundada do processo de biopolimento. Essa revisão pode envolver ajustes precisos nos parâmetros operacionais, como tempo de tratamento, concentração enzimática, pH e temperatura, ou até mesmo a consideração da incorporação de estratégias complementares para otimizar a remoção das fibras soltas e, consequentemente, minimizar de forma mais eficaz a formação do pilling.

2.5 ESTRATÉGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO BIOPOLIMENTO ENZIMÁTICO

A análise aprofundada da literatura científica existente e a consulta detalhada às fichas técnicas de diversos produtos enzimáticos disponíveis no mercado revelaram um leque de potenciais abordagens para aprimorar o processo de biopolimento atualmente empregado. O objetivo central dessa investigação foi identificar estratégias capazes de promover uma eliminação mais completa e eficiente das fibras superficiais soltas, precursoras do indesejável pilling nos tecidos de algodão processados pela lavanderia industrial.

Entre as diversas soluções promissoras que emergiram dessa revisão, algumas se destacaram pela sua potencial capacidade de otimizar o biopolimento. Uma delas reside na otimização precisa das condições de processo, o que envolve um ajuste criterioso de parâmetros cruciais como a concentração da enzima celulase utilizada, a duração do tratamento aplicado ao tecido, a temperatura ideal para a máxima atividade enzimática e a manutenção do pH adequado para a reação de hidrólise das ligações glicosídicas da celulose. Outra estratégia relevante envolve a seleção criteriosa de enzimas celulases que apresentem uma maior especificidade e atividade direcionada às fibras de algodão, buscando uma ação enzimática mais eficiente e, ao mesmo tempo, precisamente controlada para evitar danos à estrutura do tecido.

Adicionalmente, a implementação de etapas de pré-tratamento nos tecidos antes da aplicação das enzimas celulases surge como uma tática interessante para facilitar o acesso das enzimas às microfibrilas superficiais, aumentando potencialmente a eficácia do biopolimento subsequente. Por fim, a adoção de métodos de monitoramento contínuo da atividade enzimática durante o processo e a avaliação objetiva do grau de pilling resultante podem fornecer dados valiosos para realizar ajustes em tempo real, garantindo uma maior consistência e eficácia na eliminação do pilling. A combinação estratégica e bem fundamentada dessas soluções, considerando tanto o conhecimento científico quanto as necessidades e particularidades da empresa, apresenta um caminho promissor para alcançar uma melhoria significativa na eficácia do processo de biopolimento e, consequentemente, na qualidade dos tecidos de algodão processados.

2.6 BENEFÍCIOS DA OTIMIZAÇÃO DO BIOPOLIMENTO

A adoção e a implementação de um processo de biopolimento otimizado e bem ajustado desencadeiam uma cascata de vantagens significativas que reverberam tanto na dinâmica operacional da indústria têxtil quanto na experiência e satisfação do consumidor final. No âmbito industrial, um biopolimento de alta eficácia se traduz diretamente na produção de tecidos que exibem uma notável resistência à formação do pilling, elevando o valor intrínseco do produto acabado e, consequentemente, minimizando o volume de reclamações de clientes e as perdas financeiras associadas a produtos defeituosos. Além disso, o processo de biopolimento pode conferir aos tecidos de algodão um toque substancialmente mais macio e agradável, com um acabamento superficial mais liso e um brilho sutil que aprimora a estética do material. Para o consumidor, esses aprimoramentos se materializam em roupas e outros artigos têxteis que demonstram uma maior durabilidade ao longo do tempo, mantendo uma aparência impecável por um período consideravelmente mais extenso e proporcionando uma sensação mais confortável e suave em contato com a pele. Vale ressaltar que a incorporação de tecnologias inovadoras como o biopolimento também se harmoniza com a crescente e urgente demanda global por práticas e processos produtivos que incorporem princípios de sustentabilidade ambiental na indústria têxtil, agregando um valor adicional à marca e aos produtos.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 ANÁLISE MICROSCÓPICA

A análise microscópica das amostras de tecido de algodão desempenhou um papel fundamental na investigação detalhada do fenômeno de pilling em diversas fases do processamento têxtil, com os resultados apresentados na Figura 1.

No exame dos tecidos em seu estado bruto, ou seja, crus, observou-se uma quantidade considerável de pilling sob uma magnificação de 10x (Fig. 1-a). Essa constatação evidencia a inerente suscetibilidade do algodão não processado ao desenvolvimento de pilosidades, um aspecto intrínseco à sua estrutura fibrosa.

Ao analisar a amostra pré-alvejada (Fig. 1-b), notou-se uma leve diminuição na presença de pilling após a etapa de clareamento. Esse achado sugere que o processo de alvejamento exerce um efeito mitigador inicial sobre a formação de pilling; contudo, é importante ressaltar que o pilling não foi completamente eliminado nessa fase.

O tecido que passou pelo tingimento com pigmento laranja (Fig. 1-c) apresentou uma quantidade reduzida de pilling em comparação com a amostra pré-alvejada. Essa diferença pode ser atribuída, em parte, à uniformidade da coloração, que potencialmente facilitou a visualização e a quantificação mais precisa das pilosidades presentes na superfície do tecido.

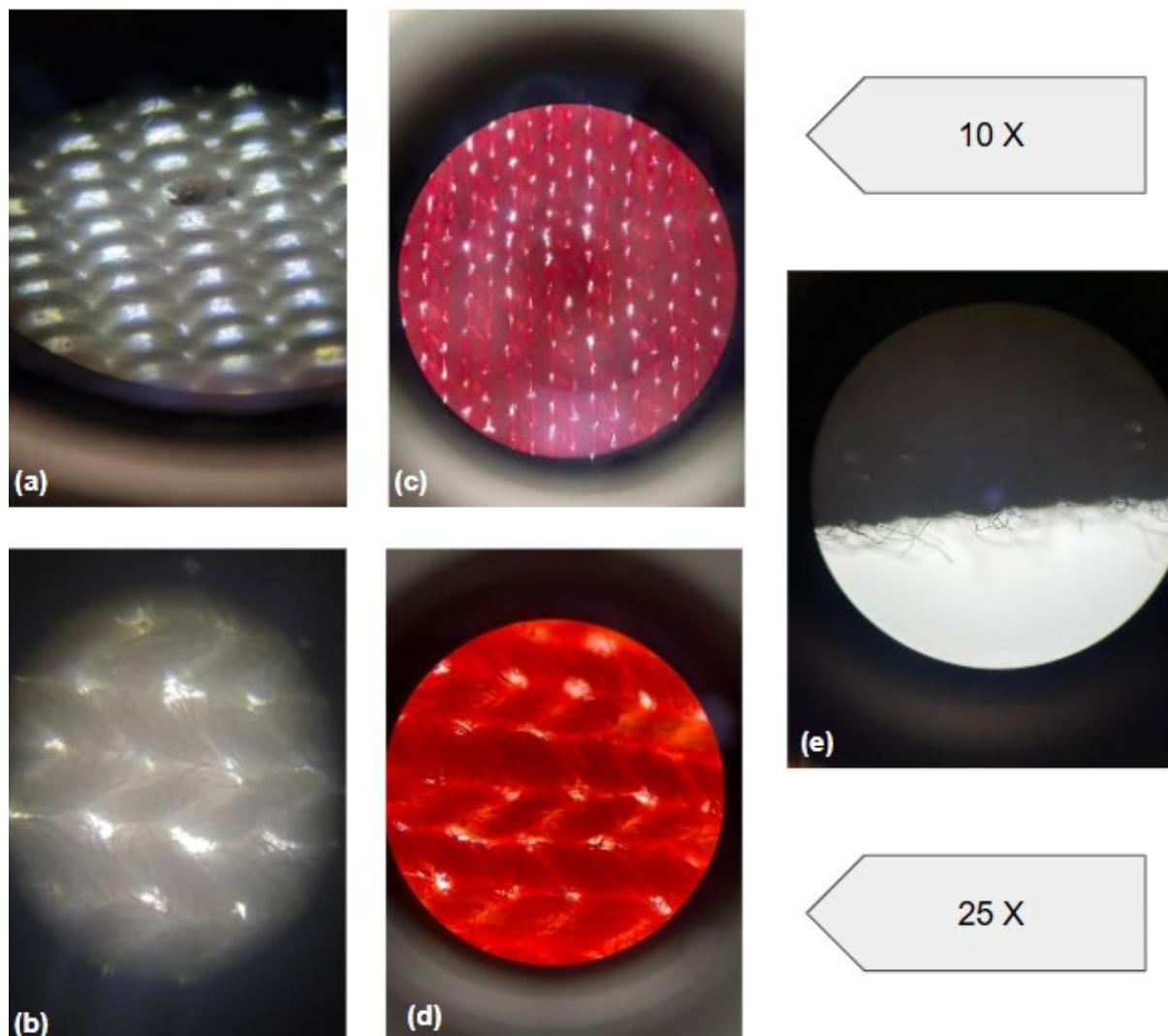
O aumento da magnificação para 25x (Fig. 1-b e 1-d) proporcionou uma visualização mais clara e detalhada do pilling, revelando a presença de fibras emaranhadas tanto no tecido pré-alvejado quanto no tecido cru dobrado (Fig. 1-e).

A análise comparativa entre as amostras revelou que o tecido cru exibia fibras mais densamente emaranhadas, contribuindo para a maior propensão ao pilling observada nesse estágio. Em contrapartida, o processo de alvejamento parece induzir um afrouxamento da estrutura fibrosa, explicando possivelmente a discreta redução no *pilling* observada na amostra pré-alvejada. No tecido tingido, a uniformidade da cor permitiu identificar que, apesar da menor quantidade, o *pilling* remanescente se tornava mais perceptível, podendo influenciar a intensidade da coloração.

Essas observações microscópicas evidenciam a complexa interação entre o entrelaçamento das fibras, os diversos processos de beneficiamento têxtil e a tendência à formação de *pilling*. Nesse contexto, a eficácia do biopolimento enzimático na remoção ou prevenção do *pilling* assume um papel crucial na determinação da qualidade final do tecido.

Os resultados obtidos sugerem que o processo de biopolimento atualmente empregado na lavanderia industrial analisada promove uma redução do *pilling*, mas não o elimina por completo. Portanto, a otimização desse processo emerge como uma estratégia promissora para aprimorar a qualidade dos tecidos de algodão, com foco na minimização efetiva da formação de *pilling*.

Figura 1 - Imagens das amostras de tecido no microscópio: (a) malha crua; (b) malha pré-alvejada; (c) malha tinta; (d) malha sem biopolimento; (e) *pilling* em malha crua.



3.2 PROPOSIÇÃO DE UM PROCESSO DE TINGIMENTO E BIOPOLIMENTO MODIFICADO

As análises microscópicas conduzidas nas instalações laboratoriais da UNIFEBE forneceram evidências que corroboram a hipótese inicial de que o processo de biopolimento atualmente empregado na empresa em questão demonstra uma eficácia limitada na resolução completa do problema de *pilling*. Diante dessa constatação, o presente estudo direcionou seus esforços para a investigação aprofundada de potenciais soluções, visando mitigar esse desafio persistente.

Um dos parâmetros críticos que se destaca como passível de otimização é a concentração enzimática. A literatura especializada, conforme apontado por Miettinen-Oinonen (1997), sugere uma faixa de dosagem que varia de 0,05% a 6% de enzima em relação à massa do substrato têxtil. Essa faixa é ajustável em função do efeito desejado, das características específicas do processo em questão e da

atividade enzimática da enzima utilizada. Estudos comparativos que avaliaram diferentes formulações de celulases, incluindo uma celulase ácida comercial, uma celulase ácida multicomponente e uma endoglucanase ácida monocomponente, em tecido de algodão "interlock", demonstraram claramente a influência significativa da seletividade enzimática, da relação de banho empregada e da agitação mecânica aplicada na eficácia global do processo de biopolimento. A seleção criteriosa da enzima, considerando sua seletividade tanto em relação ao equipamento utilizado quanto ao tipo de fibra que está sendo processada, emerge como um fator determinante para a obtenção de um acabamento enzimático otimizado e de alta qualidade (Lin; Hsieh, 2001).

Adicionalmente, a determinação precisa da concentração proteica presente no complexo enzimático assume um papel de relevância na correta interpretação dos resultados obtidos nas análises de atividade enzimática específica (Perfeto, 2012). É importante ressaltar que a concentração proteica total encontrada em celulases comerciais nem sempre apresenta uma correlação direta com a atividade celulásica, o que se deve à presença de proteínas não celulásicas ou desnaturadas no complexo enzimático.

A estratégia central delineada para o aprimoramento do processo de biopolimento na empresa em foco baseou-se em um ajuste cuidadoso e preciso dos parâmetros de pH, temperatura, tempo de contato e concentração enzimática. Esse ajuste foi realizado em estrita consonância com as recomendações da literatura especializada e as especificações técnicas detalhadas do produto Biokey 48. A enzima Biokey 48, um composto enzimático formulado com celulases selecionadas, foi avaliada como uma alternativa promissora para o biopolimento em uma ampla faixa de pH, demonstrando sua aplicabilidade especialmente em artigos finos de algodão e suas misturas. Suas propriedades físico-químicas, que incluem sua forma líquida levemente amarelada, pH entre 4,0 e 6,0, solubilidade em água e caráter aniónico, mostram-se compatíveis com as exigências encontradas em processos industriais.

A aplicação otimizada da enzima Biokey 48 requer a adesão rigorosa aos parâmetros especificados pelo fabricante, considerando a influência de fatores, como pH, temperatura, tempo de contato e a quantidade de fibrilas presentes no tecido a ser tratado. Recomenda-se o monitoramento cuidadoso das variações físicas observadas no tecido durante o processo, para realizar ajustes precisos na dosagem enzimática, evitando tanto a insuficiência quanto o excesso de enzima. Em lavanderias industriais, a maior agressividade física característica do processo pode favorecer a quebra das fibrilas e, consequentemente, permitir a utilização de tempos de contato enzimático menores em comparação com tinturarias. As recomendações do fornecedor para a enzima Biokey 48 incluem uma dosagem na faixa de 0,3% a

0,5%, tempo de contato de 15 a 30 minutos, temperatura entre 50 °C e 60 °C e pH entre 5,0 e 7,0. O armazenamento adequado da enzima, em recipientes fechados, protegidos da luz solar e em temperatura controlada, é crucial para a manutenção de sua estabilidade por até 6 meses.

A enzima EZ 9012, fornecida pela empresa Hanier Especialidades Químicas, representa outra alternativa viável para o biopolimento de artigos celulósicos. Sua aplicação tem como objetivo principal a remoção eficaz de fibrilas superficiais e a prevenção da formação de *pilling*. A eficácia desta enzima é influenciada por uma variedade de fatores, incluindo a composição, construção e densidade do tecido, o tempo de tratamento empregado, o pH e a temperatura do banho, a relação de banho utilizada, a ação mecânica do equipamento e a presença de outros produtos químicos no processo. O fornecedor enfatiza a importância crítica do controle preciso do pH, da temperatura e da relação de banho, recomendando uma relação de banho máxima de 1:8 para otimizar a eficiência da enzima EZ 9012 em lavanderias industriais. A dosagem recomendada para processos descontínuos (esgotamento) em fibra de algodão varia de 1% a 2%. O protocolo de aplicação sugerido pelo fornecedor envolve o ajuste do pH do banho para a faixa entre 4 e 5,5, a dosagem da enzima, o aquecimento do banho a 55 °C e a manutenção destas condições por um período de 30 a 60 minutos. A inativação da enzima é realizada elevando-se o pH para 9 com a adição de barrilha e aquecendo o banho a 75 °C por 10 minutos. Após a conclusão do biopolimento, o tecido deve ser lavado antes de prosseguir para as etapas subsequentes do processo.

3. 3 RELAÇÃO ENTRE O PROCESSO ATUAL E AS FICHAS TÉCNICAS

A Tabela 1 apresenta uma comparação sistemática entre os parâmetros do processo de biopolimento atualmente empregado na empresa e as recomendações dos fornecedores das enzimas Biokey 48 e EZ 9012 para otimizar a eficácia do tratamento. Os dados compilados na tabela foram extraídos das fichas técnicas de cada produto, as quais refletem os resultados de testes e definições estabelecidas pelos fabricantes em seus laboratórios.

Tabela 1 - Características das enzimas para biopolimento: atual e sugerida

Enzima - características	Biokey 48 - atual	Biokey 48 - ficha técnica	EZ 9012
Fornecedor	Akmey	Akmey	Hanier
pH de aplicação	Não é citado	5,0 a 7,0	4,5 a 5,0
Tempo de contato	13 minutos	15 a 30 minutos	30 a 60 minutos
Temperatura ideal de aplicação	65°C	50°C a 60°C	55°C

Tipo de enzima	Celulase	Celulase	Celulase
Dosagem	0,35%	0,3% a 0,5%	1,0% a 2,0%
Relação de banho	1/8	Não é citado	1/8
Desativação	Não é citado	Aumento temperatura ou pH	pH 9,0 a 75°C

Fonte: Processo de biopolimento atual e ficha técnica das enzimas EZ 9012 e Biokey 48.

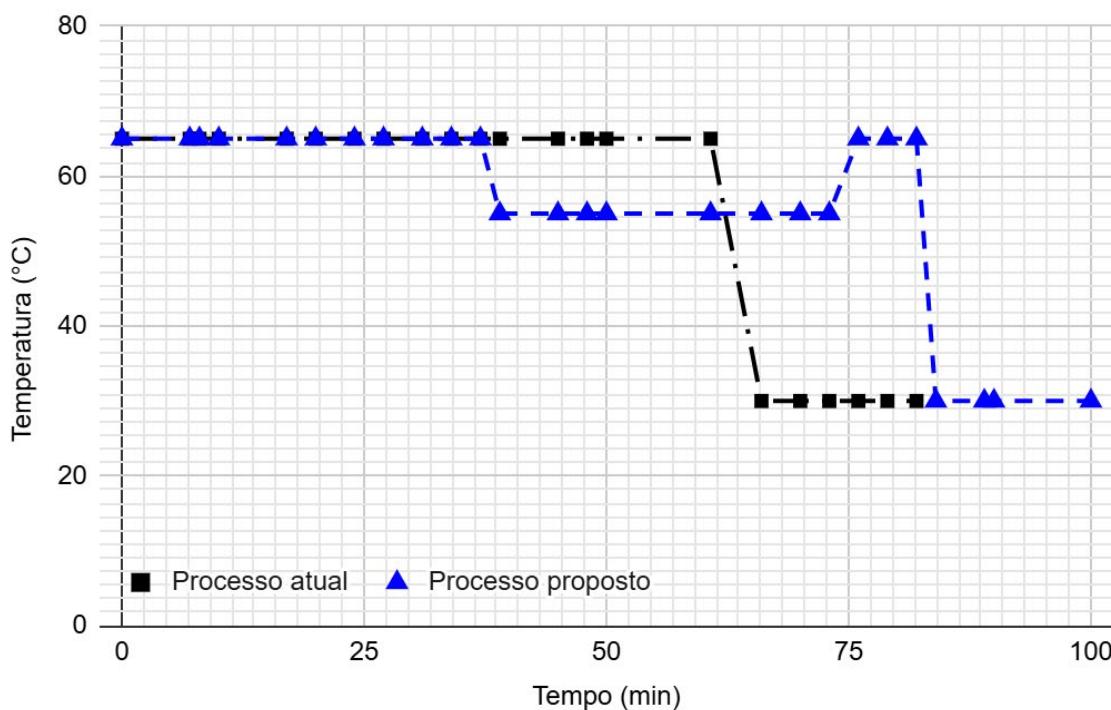
A comparação entre o processo atual e as recomendações dos fornecedores revela discrepâncias significativas em parâmetros críticos que afetam a eficácia do biopolimento. Por exemplo, o processo atual carece de controle de pH, o que pode comprometer a atividade enzimática das celulases, que atuam em faixas de pH ótimas (5,0 a 7,0 para Biokey 48 e 4,5 a 5,0 para EZ 9012).

Da mesma forma, a temperatura inadequada pode desnaturar a enzima (50 °C a 60 °C para Biokey 48 e 55 °C para EZ 9012), e o tempo de contato insuficiente (15 a 30 minutos para Biokey 48 e 30 a 60 minutos para EZ 9012) resulta em remoção incompleta das fibrilas. Além disso, a dosagem incorreta (0,3% a 0,5% para Biokey 48 e 1,0% a 2,0% para EZ 9012) leva ao desperdício ou ineficácia da enzima, e a relação de banho inadequada (1:8 para EZ 9012) prejudica a interação enzima-substrato.

Por fim, métodos de desativação inadequados podem deixar resíduos de enzima ativa, danificando o tecido. A Tabela 1 reforça a necessidade de alinhar o processo atual com as melhores práticas dos fornecedores para otimizar o biopolimento. Dessa forma, o controle adequado de pH, temperatura, tempo de contato, dosagem, relação de banho e desativação da enzima é essencial para a eficácia, qualidade e eficiência econômica do processo.

A Figura 2 ilustra, por meio de gráficos de temperatura em função do tempo, a sequência de etapas do processo de tingimento e biopolimento, tanto na metodologia atual quanto na proposta de otimização. O gráfico do processo atual (representado pela linha com marcadores quadrados pretos) exibe uma temperatura relativamente constante ao longo do tempo, com variações abruptas em momentos específicos do processo. Em contraste, o gráfico do processo proposto (representado pela linha com marcadores triangulares azuis) demonstra uma variação mais controlada e gradual da temperatura, especialmente na etapa de biopolimento, onde se observam patamares e transições de temperatura mais definidos e ajustados.

Figura 2 - Comparação entre o processo de biopolimento atual e o processo proposto.



A comparação visual fornecida pela Figura 2 destaca as diferenças cruciais entre o processo de biopolimento atual e a abordagem otimizada. Enquanto o processo atual opera com uma temperatura mais constante, o que pode levar a ineficiências e menor controle sobre a atividade enzimática, o processo proposto introduz uma dinâmica de temperatura mais refinada. As variações de temperatura controladas no processo otimizado refletem a preocupação em ajustar precisamente as condições para a ação enzimática ideal, como recomendado pelas especificações técnicas das enzimas e pela literatura especializada. Essa modulação da temperatura, juntamente com o controle de outros parâmetros, como pH e concentração enzimática, tem o potencial de aumentar significativamente a eficácia do biopolimento, resultando em tecidos com qualidade superior e menor propensão ao *pilling*.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise abrangente realizada nesta pesquisa lança luz sobre a importância crítica da aplicação precisa e otimizada de enzimas nos processos de biopolimento, especialmente quando o foco reside na mitigação eficaz do fenômeno de *pilling* em tecidos, um desafio persistente na indústria têxtil. As observações meticulosas e os resultados robustos obtidos por meio das análises microscópicas conduzidas ao longo deste estudo fornecem evidências empíricas que confirmam uma realidade complexa: o processo de biopolimento atualmente empregado na lavanderia

industrial parceira, embora demonstre uma capacidade inegável de promover uma redução perceptível na ocorrência de *pilling*, não atinge a desejável marca da eliminação completa desse problema.

Essa constatação, por si só, ressalta a necessidade premente de um escrutínio aprofundado e de um refinamento estratégico das metodologias existentes, buscando alavancar o potencial máximo do biopolimento enzimático. Nesse contexto, a comparação direta e sistemática entre o protocolo de biopolimento em prática e as recomendações técnicas detalhadas fornecidas pelos fabricantes das enzimas (especificamente Biokey 48 e EZ 9012) revela discrepâncias notáveis em uma série de parâmetros cruciais que governam a eficácia do processo.

Parâmetros como o pH da solução, a temperatura de aplicação das enzimas, o tempo de contato entre a enzima e o tecido, e a dosagem precisa da enzima são identificados como fatores de influência crítica que demandam uma atenção especial. A otimização cuidadosa desses parâmetros, guiada pelas evidências científicas e pelas especificações técnicas dos fornecedores, emerge como uma estratégia promissora para aprimorar consideravelmente a eficácia do biopolimento e, por conseguinte, elevar a qualidade final dos tecidos tratados.

As melhorias propostas neste estudo, que abrangem desde o ajuste fino dos parâmetros do processo até a criteriosa avaliação de enzimas alternativas com perfis de ação otimizados e a implementação de sistemas robustos de monitoramento e controle contínuo, representam um esforço concentrado para alinhar o protocolo de biopolimento da empresa com as melhores práticas estabelecidas pela indústria têxtil global. A Figura 2 do estudo serve como uma representação visual poderosa desse conceito, ilustrando claramente o potencial de um processo de biopolimento otimizado para gerar resultados superiores.

No entanto, é crucial enfatizar que a transição do conhecimento teórico para a aplicação prática requer uma etapa fundamental de validação. Recomenda-se fortemente a realização de testes práticos e abrangentes nas instalações da empresa, para verificar empiricamente a eficácia das otimizações propostas e determinar a combinação estratégica de abordagens que se mostre mais adequada para atender às necessidades e aos desafios específicos enfrentados pela organização.

A busca incessante pela excelência deve ser o princípio norteador nesse processo, visando não apenas aprimorar a qualidade dos produtos têxteis, mas também fortalecer a posição competitiva da empresa no exigente mercado consumidor. Ao investir em inovação e otimização contínua, a indústria têxtil pode superar os desafios impostos pelo *pilling* e entregar produtos de valor superior aos consumidores.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Lavanderia Têxtil Multilave no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDREAUS, J. A aplicação de celulase em processos de desbotamento. **Revista Química Têxtil**, n° 64, 2001. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30306/1/Aplica%C3%A7%C3%A3o%C3%B5esEnzimasInd%C3%BAstria.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

FERREIRA, F. C. S. **Avaliação dos efeitos da aplicação da enzima celulase nas propriedades de substratos têxteis de algodão**. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Florianópolis, 2012. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFSC_c4b054a547268f17925da9a04f1cd9b4. Acesso em: 21 mar. 2025.

FERREIRA, F. C. S. **Avaliação dos efeitos da aplicação da enzima celulase nas propriedades de substratos têxteis de algodão**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2012. Disponível em: Avaliação dos efeitos da aplicação da enzima celulase nas propriedades de substratos têxteis de algodão (ufsc.br). Acesso em: 7 out. 2025.

GONÇALVES, Ana Sofia da Silva. **Estudo de defeitos na indústria têxtil**. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, 2022. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/83758/1/Ana%20Sofia%20da%20Silva%20Goncalves.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

LIN, C. H.; HSIEH, Y. L. Direct scouring of greige cotton fabrics with proteases. **Textile Research Journal**, v. 71, n. 5, p. 425-434, 2001.

MARROQUES, Julia Cruz *et al.* **Aplicação de enzimas na indústria têxtil**. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30306/1/Aplica%C3%A7%C3%A3o%C3%B5esEnzimasInd%C3%BAstria.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

MIETTINEN-OINONEN, A. S. K.; ELOVAINIO, M. J.; SUOMINEN, P. L. **Cellulase composition for biofinishing cellulose-containing textile materials**. Patente Americana 5858767, 1997.

MONTEIRO, Valdirene Neves; DO NASCIMENTO SILVA, Roberto. Aplicações industriais da biotecnologia enzimática. **Revista Processos Químicos**, v. 3, n. 5, p. 9-23, 2009.

PERFETO, M. W. **Avaliação do efeito da inibição da celulase no biopolimento de substrato de algodão**. 2012. 96 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/31336/1/avaliacaobiopolimentotecidodenim.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SILVA, Daniele Cardoso da. **Avaliação da eficácia do tratamento enzimático de biopolimento de tecido denim**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31336>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SILVA, Daniele Cardoso da. **Avaliação da eficácia do tratamento enzimático de biopolimento de tecido denim**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31336>. Acesso em: 21 mar. 2025.