

**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Bruna Luana da Silva Oliveira

**Acompanhamento de tratamentos  
enzimáticos na indústria têxtil**

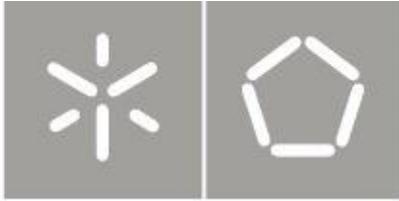
**Acompanhamento de tratamentos enzimáticos  
na indústria têxtil**

Bruna Luana da Silva Oliveira

UMinho | 2022

outubro de 2022





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Bruna Luana da Silva Oliveira

**Acompanhamento de tratamentos  
enzimáticos na indústria têxtil**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Química e Biológica

Trabalho efetuado sob orientação da

**Doutora Isabel Soares de Carvalho**

## Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### **Licença concedida aos utilizadores deste trabalho**



**Atribuição-NãoComercial**  
**CC BY-NC**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

## Agradecimentos

Esta dissertação é o fruto de cinco anos de aprendizagem e trabalho, ao longo dos quais contei com o apoio de algumas pessoas e instituições às quais devo o meu agradecimento.

Começo por agradecer à minha família, em particular aos meus pais e irmã, porque foram aqueles que sempre me apoiaram, me motivaram a ser melhor e me proporcionaram tudo para que eu conseguisse ter sucesso academicamente. Aos meus amigos, obrigada pelo apoio incansável durante estes cinco anos do meu percurso académico e por todos os momentos de alegria e descontração.

À Universidade do Minho deixo o meu agradecimento por todas as oportunidades disponibilizadas durante a licenciatura e o mestrado, que permitiram o meu desenvolvimento a nível profissional e pessoal. À Doutora Isabel Carvalho e à Professora Mariana Henriques agradeço por todo o apoio prestado durante o estágio curricular e na escrita da dissertação, por todos os conselhos e correções que permitiram que esta dissertação ficasse o melhor possível. Quero também agradecer aos profissionais do Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade do Minho, por todo o tempo despendido e pelo material cedido para que pudesse realizar os testes necessários para a minha dissertação.

Por último, agradeço à empresa Acatel – Acabamentos Têxteis S.A. pela oportunidade de estágio curricular concedida. Deixo um agradecimento especial ao Engenheiro Pedro Gomes, que me orientou da melhor forma possível durante os meses de estágio e me ajudou a analisar todo o trabalho realizado. Não posso também deixar de agradecer a todos os profissionais que me ajudaram na empresa, em particular aos profissionais do laboratório da qualidade e do departamento de *seamless*.

## Declaração de integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

# Acompanhamento de tratamentos enzimáticos na indústria têxtil

## Resumo

Uma das características mais importantes num tecido ou num artigo de vestuário é o aspeto visual, sendo um dos principais desafios da indústria têxtil a prevenção do aparecimento do *pilling*, vulgarmente conhecido por borboto, que afeta significativamente o aspeto visual de um produto. Com base nisso, o principal objetivo desta dissertação foi o estudo de diferentes enzimas para aplicar no *biopolishing* de quatro fibras têxteis distintas: algodão, liocel, modal e viscose, de forma a prevenir o aparecimento do *pilling*.

O estudo teve por base a seleção das enzimas adequadas *biopolishing* de fibras têxteis, segundo uma pesquisa bibliográfica inicial, tendo em conta as necessidades da empresa, a aplicação das enzimas em contexto industrial, a realização de testes laboratoriais para aferir a eficiência das mesmas e por fim, a seleção da enzima mais adequada para o *biopolishing* de cada fibra têxtil.

Desta forma, foram selecionadas 15 enzimas provenientes de 5 fornecedores distintos. Dentro das enzimas selecionadas, apenas 5 eram recomendadas pelos fornecedores para o *biopolishing* da viscose e do modal. Como tal, as 15 enzimas foram testadas no algodão e no liocel e apenas 5 na viscose e no modal. As condições na aplicação do *biopolishing* foram definidas para cada enzima e foram aplicadas de igual forma a todas as fibras têxteis.

De seguida, todas as amostras foram submetidas a testes laboratoriais, de forma a verificar a eficácia enzimática. Como tal, recorreu-se aos testes de abrasão, resistência à formação do *pilling* e rebentamento. Foi ainda avaliado o aspeto final das amostras a nível visual e foi realizada uma análise económica ao processo.

Por fim, de forma a selecionar a enzima mais adequada para o *biopolishing* das 4 fibras têxteis em estudo, foi realizada uma comparação final com os resultados obtidos em todos os parâmetros estudados e concluiu-se que as enzimas mais eficazes no *biopolishing* do algodão, liocel e modal foram as enzimas M, H e L, respetivamente, possuindo todas elas características de estabilidade em meios neutros. Quanto à viscose, concluiu-se que nenhuma das enzimas estudadas foi eficaz no seu *biopolishing*, o que se deve ao facto de ainda não existirem no mercado enzimas eficazes no tratamento desta fibra têxtil.

**Palavras-chave:** *Biopolishing*, celulose, enzima, *pilling*.

# Monitoring of enzymatic treatments in the textile industry

## Abstract

One of the most important characteristics of a fabric or clothing is the visual aspect also, one of the main challenges of the textile industry is to prevent pilling that significantly affects the visual aspect of a product. Based on this, the main objective of this dissertation was to study different enzymes to apply in the biopolishing of four distinct textile fibers: cotton, lyocell, modal and viscose, to prevent pilling.

The study was based on initial bibliographic research on the state of the art of the use of enzymes in the biopolishing of textile fibers, the selection of the appropriate enzymes considering the needs of the company, the application of enzymes in an industrial context, the performance of laboratory tests to assess their efficiency and, finally, the selection of the most suitable enzyme for the biopolishing of each textile fiber.

Thus, 15 enzymes were selected from 5 different suppliers. Among the selected enzymes, only 5 were recommended by the suppliers for the biopolishing of viscose and modal. As such, the 15 enzymes were tested on cotton and lyocell and only 5 on viscose and modal. The conditions in biopolishing application were defined for each enzyme and were applied in the same way to all textile fibers.

Afterwards, all the samples were submitted to laboratory tests, to verify the enzymatic effectiveness. As such, tests of abrasion, resistance to pilling and bursting were used. The final aspect of the samples was also evaluated visually, and an economic analysis of the process was carried out.

Finally, to select the most suitable enzyme for the biopolishing of the 4 textile fibers under study, a final comparison was made with the results obtained in all parameters studied and it was concluded that the most effective enzymes in the biopolishing of cotton, lyocell and modal were the enzymes M, H and L, respectively, all having characteristics of stability in neutral media. As for viscose, it was concluded that none of the enzymes studied was effective in its biopolishing, since there are still no effective enzymes on the market for the treatment of this textile fiber.

**Keywords:** Biopolishing, cellulose, enzyme, pilling.

# Índice

Índice de figuras.....	viii
Índice de tabelas .....	ix
Lista de abreviaturas, acrónimos e siglas .....	xi
Lista de símbolos .....	xii
Capítulo 1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. O grupo: Impetus .....	2
1.4. A empresa: Acatel .....	4
1.5. Estrutura da dissertação.....	6
Capítulo 2. Revisão bibliográfica.....	7
2.1. A indústria têxtil .....	7
2.2. Fibras têxteis.....	8
2.2.1. Algodão .....	10
2.2.2. Celulose .....	11
2.2.3. Celulose regenerada .....	12
2.3. Enzimas.....	13
2.3.1. Atividade enzimática .....	14
2.3.2. Efeito da temperatura na atividade enzimática.....	15
2.3.3. Efeito do pH na atividade enzimática .....	16
2.3.4. Aplicação na indústria têxtil .....	16
2.3.5. Celulase .....	17
2.4. <i>Pilling</i> .....	18
2.5. <i>Biopolishing</i> .....	20
2.5.1. <i>Biopolishing</i> na Acatel .....	21
2.6. Testes de verificação da eficácia enzimática .....	22
2.6.1. Teste de abrasão .....	22
2.6.2. Teste de resistência à formação de <i>pilling</i> .....	23
2.6.3. Teste de rebentamento .....	24
Capítulo 3. Metodologia do trabalho experimental .....	25
3.1 Seleção das enzimas a estudar.....	25
3.2. Preparação das amostras das fibras têxteis .....	26
3.3. Aplicação do <i>biopolishing</i> .....	26
3.4. Teste de abrasão.....	27

3.5. Teste de resistência à formação de <i>pilling</i> .....	29
3.6. Teste de rebentamento.....	30
3.7. Classificação do aspeto visual .....	30
3.8. Análise económica .....	31
Capítulo 4. Resultados e discussão .....	32
4.1. Algodão.....	32
4.1.1. Teste de abrasão .....	32
4.1.2. Teste de resistência à formação de <i>pilling</i> .....	33
4.1.3. Teste de rebentamento .....	34
4.1.4. Aspeto visual.....	35
4.2. Liocel.....	36
4.2.1. Teste de abrasão .....	36
4.2.2. Teste de resistência à formação de <i>pilling</i> .....	37
4.2.3. Teste de rebentamento .....	38
4.2.4. Aspeto visual.....	39
4.3. Viscose .....	39
4.3.1. Teste de abrasão .....	40
4.3.2. Teste de resistência à formação de <i>pilling</i> .....	40
4.3.3. Teste de rebentamento .....	41
4.3.4. Aspeto visual.....	42
4.4. Modal .....	42
4.4.1. Teste de abrasão .....	43
4.4.2. Teste de resistência à formação do <i>pilling</i> .....	43
4.4.3. Teste de rebentamento .....	44
4.4.4. Aspeto visual.....	44
4.5. Análise económica .....	45
4.6. Comparação final.....	46
Capítulo 5. Considerações finais e recomendações futuras.....	51
Referências bibliográficas .....	52
Anexos .....	55
Anexo I – Condições de aplicação das diferentes enzimas no <i>biopolishing</i> das diferentes fibras têxteis .....	55
Anexo II – Análise económica .....	59
II.1. Custo da matéria-prima .....	59
II.2. Custo energético .....	60

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Roupa de desporto da marca Impetus, à esquerda. Pijama da marca I Am What I Wear, à direita.....	4
<b>Figura 2:</b> À esquerda, calções da coleção primavera/verão de 2023. À direita, vestido da coleção outono/inverno de 2023.....	5
<b>Figura 3:</b> Aplicação das enzimas na indústria têxtil.....	8
<b>Figura 4:</b> Estrutura química do algodão. ....	10
<b>Figura 5:</b> Fórmula química da celulose. ....	11
<b>Figura 6:</b> Equação geral de uma reação enzimática. ....	14
<b>Figura 7:</b> Esquema representativo do funcionamento de uma enzima. ....	14
<b>Figura 8:</b> Efeito da temperatura na velocidade de uma reação enzimática. ....	15
<b>Figura 9:</b> Efeito do pH na velocidade da reação enzimática. ....	16
<b>Figura 10:</b> Substrato têxtil com <i>pilling</i> na superfície (A) e substrato têxtil sem <i>pilling</i> (B).. ....	19
<b>Figura 11:</b> Ação da celulase em algodão. ....	20
<b>Figura 12:</b> Exemplos da imagem de Lissajous aceitável (a) e inaceitável (b, c). ....	22
<b>Figura 13:</b> Equipamento utilizado na aplicação do <i>biopolishing</i> .....	27
<b>Figura 14:</b> Equipamento utilizado para a realização do teste de abrasão e do teste de resistência à formação de <i>pilling</i> . ....	28
<b>Figura 15:</b> Equipamento utilizado para a realização do teste de rebentamento. ....	30

## Índice de tabelas

<b>Tabela 1:</b> Classificação das diferentes fibras têxteis. ....	9
<b>Tabela 2:</b> Propriedades de algumas fibras celulósicas regeneradas em comparação com o algodão. 12	12
<b>Tabela 3:</b> Classificação de enzimas e tipo de reação catalisada associada.....	13
<b>Tabela 4:</b> Intervalos de avaliação para o teste de abrasão. ....	23
<b>Tabela 5:</b> Intervalos de avaliação para o teste de resistência à formação de <i>pilling</i> . ....	24
<b>Tabela 6:</b> Enzimas selecionadas para o estudo e as suas características técnicas.....	25
<b>Tabela 7:</b> Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de algodão.....	32
<b>Tabela 8:</b> Resultados obtidos no teste de resistência à formação de <i>pilling</i> nas amostras de algodão33	33
<b>Tabela 9:</b> Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de algodão.....	34
<b>Tabela 10:</b> Aspeto visual final das amostras de algodão.....	35
<b>Tabela 11:</b> Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de liocel ..... 36	36
<b>Tabela 12:</b> Resultados obtidos no teste de resistência à formação de <i>pilling</i> nas amostras de liocel. 37	37
<b>Tabela 13:</b> Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de liocel ..... 38	38
<b>Tabela 14:</b> Aspeto visual final das amostras de liocel..... 39	39
<b>Tabela 15:</b> Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de viscose ..... 40	40
<b>Tabela 16:</b> Resultados obtidos no teste de resistência à formação de <i>pilling</i> nas amostras de viscose ..... 41	41
<b>Tabela 17:</b> Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de viscose ..... 41	41
<b>Tabela 18:</b> Aspeto visual final das amostras de viscose..... 42	42
<b>Tabela 19:</b> Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de modal..... 43	43
<b>Tabela 20:</b> Resultados obtidos no teste de resistência à formação de <i>pilling</i> nas amostras de modal43	43
<b>Tabela 21:</b> Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de modal..... 44	44
<b>Tabela 22:</b> Aspeto visual final das amostras de modal ..... 45	45
<b>Tabela 23:</b> Análise económica do <i>biopolishing</i> para cada enzima estudada..... 45	45
<b>Tabela 24:</b> Comparação final dos resultados obtidos no <i>biopolishing</i> do algodão..... 48	48
<b>Tabela 25:</b> Comparação final dos resultados obtidos no <i>biopolishing</i> do liocel..... 49	49
<b>Tabela 26:</b> Comparação final dos resultados obtidos no <i>biopolishing</i> da viscose..... 50	50
<b>Tabela 27:</b> Comparação final dos resultados obtidos no <i>biopolishing</i> do modal ..... 50	50
<b>Tabela 28:</b> Condições de aplicação das diferentes enzimas no <i>biopolishing</i> do algodão..... 56	56
<b>Tabela 29:</b> Condições de aplicação das diferentes enzimas no <i>biopolishing</i> do liocel..... 57	57

<b>Tabela 30:</b> Condições de aplicação das diferentes enzimas no <i>biopolishing</i> da viscose.....	58
<b>Tabela 31:</b> Condições de aplicação das diferentes enzimas no <i>biopolishing</i> do modal .....	58
<b>Tabela 32:</b> Valor comercial das enzimas estudadas .....	59
<b>Tabela 33:</b> Escala do custo associado à temperatura do processo .....	60
<b>Tabela 34:</b> Escala do custo associado à duração do processo.....	60
<b>Tabela 35:</b> Cálculo do custo energético .....	61

## Lista de abreviaturas, acrónimos e siglas

ADN – Ácido Desoxirribonucleico

C – Custo

CBH – Celobiohidrolases

CO – Algodão

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

CLY – Liocel

CMD – Modal

CTW – *Clear To Wear*

CV – Viscose

DP – Grau de polimerização

DP<sub>PR</sub> – Desvio padrão relativo à pressão de rebentamento

E – Enzima

EG – Endoglucanases

ES – Complexo enzima-substrato

ISO – *International Organization for Standardization*

m – Massa

MTD – Melhores Técnicas Disponíveis

PLA – Ácido Polilático

PME – Micro, pequenas e médias empresas

PRM – Pressão Média de Rebentamento

PVC – Policloreto de vinila

RSO – Responsabilidade Social das Organizações

RTM – *Ready To Manufacture*

S – Substrato

T – Temperatura

t – Tempo

ZDHC – *Zero Discharge of Hazardous Chemicals*

## Lista de símbolos

% – percentagem

°C – graus celsius

€ – euro

cN/tex – centinewton por tex

kg – quilograma

kPa – kilo pascal

min – minuto

mL – mililitros

mm – milímetros

# Capítulo 1. Introdução

O capítulo 1 visa introduzir o tema desta dissertação através de um enquadramento teórico, da definição dos objetivos da dissertação, da apresentação da empresa onde foi realizado o estágio curricular e da estrutura da dissertação, ao longo de 5 subcapítulos.

## 1.1. Enquadramento

A indústria têxtil compreende uma série de processos, com início na fabricação de tecidos e fios, recorrendo a fibras têxteis, terminando com a produção de diversos produtos, na área do vestuário, têxteis para o lar e têxteis técnicos (Direção-Geral das Atividades Económicas, 2018).

De forma a responder ao aumento da demanda de produtos têxteis nas últimas décadas, deu-se um crescimento na pesquisa e desenvolvimento de novas oportunidades na área da biotecnologia industrial, que constituíssem alternativas mais sustentáveis e económicas (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

Uma das principais inovações foi a utilização de enzimas em diversos processos industriais (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Recentemente, a aplicação de enzimas na indústria têxtil tem vindo a crescer devido às suas características que permitem a substituição de produtos químicos orgânicos agressivos, mas também devido às condições de temperatura e pH necessárias para a sua atividade (Wang, Yu, & Zhong, 2012).

A celulase é uma enzima com propriedades hidrolíticas e é aplicada como catalisador na transformação da celulose em oligossacarídeos, e posteriormente em glicose (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Atualmente, é amplamente utilizada em tratamentos na indústria têxtil, como por exemplo na melhoria da qualidade das fibras celulósicas e, conseqüentemente, evitar o efeito *pilling* (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

O *pilling*, vulgarmente conhecido como borboto, é uma bola de fibras que aparece na superfície dos produtos têxteis que põe em causa a qualidade dos mesmos, alterando a sua textura e conferindo uma aparência pouco atrativa (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Geralmente, estas bolas aparecem mais nas zonas sujeitas a uma elevada fricção e, como tal, os tecidos são submetidos ao processo de *biopolishing* de forma a evitar o *pilling* (Nayak & Padhye, 2015).

O *biopolishing* é um tratamento que recorre a enzimas como a celulase para hidrolisar as microfibras de celulose presentes na superfície do tecido, resultando num tecido mais macio e suave e na preservação do brilho e da cor (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

## 1.2. Objetivos

Uma das características mais importantes num tecido ou num artigo de vestuário é o aspeto visual, com base nisso, ao longo dos anos, a indústria têxtil tem vindo a melhorar os tratamentos realizados às fibras têxteis, de modo a obter sempre um produto de alta qualidade. Inicialmente, estes tratamentos eram realizados com recurso a produtos químicos dispendiosos e com elevado impacto ambiental, mas a busca pela sustentabilidade ambiental e económica por parte das empresas, levou à investigação e desenvolvimento de novas tecnologias no setor industrial em todo o mundo. Em particular na indústria têxtil, foi introduzida a utilização de enzimas em diversos tratamentos de fibras têxteis, como é o caso do *biopolishing*. Como cada fibra têxtil tem necessidades diferentes, é necessário atribuir adequadamente a enzima que vai realizar o tratamento em questão.

Com base nesta premissa, o objetivo primordial desta dissertação é o estudo de diferentes enzimas para aplicar no *biopolishing* de quatro fibras têxteis distintas: algodão, liocel, modal e viscose. Este estudo tem por base uma pesquisa bibliográfica inicial para a seleção de enzimas para o *biopolishing* de fibras têxteis, a seleção das enzimas adequadas tendo em conta as necessidades da empresa, a aplicação das enzimas em contexto industrial, a realização de testes laboratoriais para aferir a eficácia das mesmas e por fim, a seleção da enzima mais adequada para o *biopolishing* de cada fibra têxtil.

## 1.3. O grupo: Impetus

A Impetus nasce em 1973 com a produção de *underwear* e *loungewear*, sendo atualmente uma das empresas líderes mundiais no setor têxtil (Grupo Impetus, 2019). Através da experiência adquirida ao longo dos anos e da aposta nas novas tecnologias, a Impetus inseriu-se no mercado dos produtos técnicos, como vestuário de trabalho e desportivo, com e sem costuras, transformando-se num dos especialistas líderes na área de desenvolvimento dos mesmos (Grupo Impetus, 2019).

O Grupo Impetus é constituído por 6 departamentos: investigação e desenvolvimento; tricotagem e tecelagem; tingimento e acabamentos; corte e confeção; controlo da qualidade e embalagem e logística (Grupo Impetus, 2019). No departamento de investigação e desenvolvimento são elaboradas soluções específicas para as necessidades e vontades de cada cliente, originando produtos de última geração (Grupo Impetus, 2019). Para além deste departamento de investigação e desenvolvimento, a Impetus colabora com diversas universidades e centros tecnológicos do Euro-cluster do norte de Portugal, sendo este um dos mais avançados da indústria têxtil a nível europeu (Grupo Impetus, 2019).

O departamento de tricotagem e tecelagem destaca-se pela alta qualidade da matéria-prima e pela utilização de tecnologia de última geração na produção dos tecidos regulares e *seamless* (sem costuras), bem como na tecelagem de elásticos (Grupo Impetus, 2019).

O departamento de tingimento e acabamentos está inserido na empresa Acatel – Acabamentos Têxteis S.A., onde se prestam serviços de tingimento contínuo e à peça, estamparia digital e convencional e acabamentos (Grupo Impetus, 2019).

O departamento de corte está totalmente automatizado, possuindo 4 estações de corte, e com especialistas focados na otimização do consumo para a melhoria do desempenho ambiental (Grupo Impetus, 2019). A confecção vai desde o tradicional *overlock* até às mais avançadas máquinas de ultrasons e de termocolagem, resultando em produtos de elevada qualidade (Grupo Impetus, 2019).

No departamento de controlo da qualidade, todas as malhas, elásticos, acessórios e peças acabadas são testados física e quimicamente em cada etapa da produção, nos laboratórios da empresa ou através de entidades certificadas, resultando em produtos e processos em conformidade com as certificações de qualidade mais avançadas (Grupo Impetus, 2019).

No departamento de embalagem e logística, todos os produtos são dobrados, etiquetados e embalados manualmente e posteriormente armazenados num armazém totalmente automatizado, conferindo um tempo de resposta rápido aos clientes (Grupo Impetus, 2019).

Ao nível da responsabilidade ambiental, a Impetus procura a redução da sua pegada ambiental através da implementação de processos de produção mais sustentáveis, possuindo em todas as instalações sistemas de tratamento de água integrados, controlando as suas emissões gasosas, utilizando biomassa para produzir água quente e utilizando painéis fotovoltaicos (Grupo Impetus, 2019). Mais recentemente, substituiu grande parte da sua frota para carros elétricos e híbridos *plug-in*, alimentando estes com a energia produzida pelos painéis solares (Grupo Impetus, 2019).

A Impetus possui as certificações *Bluesign*, *Global Organic Textile Standard*, *Global Recycled Standard*, Índice de sustentabilidade HIGG, *OEKO-TEX Standard 100* e *Recycled Claim Standard* (Grupo Impetus, 2019). Apoia ainda a iniciativa *Better Cotton Initiative*, sendo esta uma organização global sem fins lucrativos com o maior programa de sustentabilidade do algodão a nível mundial (Grupo Impetus, 2019).

Para além de tudo isto, a Impetus ainda possui 4 marcas próprias (Figura 1): Impetus, *I am what I wear*, *Eden Park* e *ProtechDry* (Grupo Impetus, 2019). A marca Impetus é constituída por *underwear*, *beachwear* e *nightwear* com características para o combate ao frio, termo regulação, *fast drying*, para peles sensíveis e para performance desportiva (Grupo Impetus, 2019). *I am what I wear* é uma linha de

*underwear* de tendência, utilizando os melhores materiais de origem natural (Grupo Impetus, 2019). A *Eden Park* é uma marca de rugby de pronto-a-vestir de origem francesa e, desde 2009, a Impetus é responsável pela produção e comercialização da linha de roupa interior e pijamas *Eden Park*, a nível mundial (Grupo Impetus, 2019). A *ProtechDry* é a primeira marca do projeto Impetus *Healthcare*, que visa o desenvolvimento de produtos têxteis que satisfazem necessidades ligadas à saúde (Grupo Impetus, 2019). Esta marca produz roupa interior ultra-absorvente, antidor e lavável, sobretudo concebida para pessoas com problemas de incontinência urinária (Grupo Impetus, 2019).



**Figura 1:** Roupa de desporto da marca Impetus, à esquerda. Pijama da marca I Am What I Wear, à direita. Adaptado de (Impetus, 2016).

#### 1.4. A empresa: Acatel

A Acatel surge em 1985 como uma empresa de acabamentos têxteis, prestando atualmente serviços de tinturaria, mercerização, tinturaria à peça, estampania digital e tradicional e acabamentos de malhas e tecidos, recorrendo a equipamentos tecnologicamente avançados (Acatel, 2022). A estratégia empresarial desta empresa tem por base a evolução tecnológica e o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis, de forma a cumprir a sua missão de garantir a transparência e a redução da pegada carbónica (Acatel, 2022). A Acatel possui ainda duas coleções para a primavera/verão de 2023 e para o outono/inverno de 2023 (Figura 2) (Acatel, 2022).

A empresa possui várias certificações como reflexo da preocupação com a organização, o ambiente, a higiene e segurança dos trabalhadores e responsabilidade social (Acatel, 2022):

- Do produto tinturaria e estampania - OKO-TEX em 1992 e 1994, respetivamente;
- Certificação *Global Organic Textile Standard* em 2012;
- Parceira *Bluesign* em 2012;
- Empresa de acordo com os requisitos RTM-CTW - INDITEX;

- Empresa aderente ao compromisso ZDHC;
- Laboratório de controlo da qualidade certificado pela NEXT;
- Laboratório de controlo da qualidade certificado pela BODEN;
- Gestão da empresa ISO 9001 em 2002;
- Ambiente ISO 14001 em 2012;
- Higiene e segurança MTD 2011 (auditoria 1º fase pela Apcer) e cumprimento da legislação aplicável;
- Adesão à Rede Nacional de Responsabilidade Social das Organizações (RSO);
- Sistema de informação integrada permitindo a rastreabilidade completa dos produtos processados;
- É PME Líder desde 2009 e foi PME excelência em 2010, 2014 e 2016.



**Figura 2:** À esquerda, calções da coleção primavera/verão de 2023. À direita, vestido da coleção outono/inverno de 2023. Adaptado de (Acatel, 2022).

Do ponto de vista da inovação e sustentabilidade, a Acatel possui várias parcerias e utiliza processos de produção inovadores (Acatel, 2022). A *Good Earth Cotton* reduz as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, captando o mesmo para o solo, recorrendo a processos de produção avançados e ecologicamente inovadores (Acatel, 2022). A tecnologia *FiberTrace* permite a rastreabilidade e a medição do impacto de toda a cadeia de valor, desde o produto em bruto até ao consumidor final (Acatel, 2022). O Grupo Impetus em parceria com a Belda Lloréns associaram a tecnologia *FiberTrace* à utilização de resíduos colhidos pós-industrial do Grupo Impetus e Ecovero, originando assim a E\*Retrace30 (Acatel, 2022).

De forma a reduzir em 50 % as suas emissões e impacto na água, a Acatel substituiu a viscose genérica pela *Lenzing Ecovero*, onde cada fibra é produzida através de celulose com características biodegradáveis (Acatel, 2022). Assim, no final do seu ciclo de vida, estas fibras podem retornar ao ecossistema integrando o solo para o crescimento de novas plantas (Acatel, 2022). *Compostable* é um processo que tem por base o retornar ao planeta tudo o que por ele foi produzido, através da utilização

de uma pasta de impressão à base de água, o *Ecoprint* (Acatel, 2022). O *Colorifix* é um método de tingimento de materiais têxteis que recorre ao ADN de plantas e animais, originando um processo livre de químicos e com um consumo de energia reduzido (Acatel, 2022). Por fim, a Acatel apoia a iniciativa “*Make it bio*” que combina a sustentabilidade social, ambiental e económica, na realização consciente de todas as etapas no processo produtivo (Acatel, 2022).

## 1.5. Estrutura da dissertação

A estrutura desta dissertação passa pela divisão da mesma em cinco capítulos principais, que por sua vez estão divididos em subcapítulos. O primeiro capítulo visa a introdução à dissertação, englobando um enquadramento geral ao tema, a definição dos objetivos da mesma, a apresentação do Grupo Impetus e da empresa Acatel onde foi realizado o estágio curricular e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica referente ao tema da dissertação, onde são abordados tópicos como indústria têxtil, fibras têxteis, celulose, enzimas, *pilling*, *biopolishing* e testes de verificação da eficácia enzimática.

O terceiro capítulo denominado de “Metodologia do trabalho experimental”, aborda detalhadamente todas as metodologias selecionadas para cumprir todos os objetivos definidos, desde a seleção das enzimas, passando pela preparação das amostras das fibras têxteis e pela aplicação do *biopolishing*, até aos diferentes testes laboratoriais realizados.

No quarto capítulo, “Resultados e Discussão”, são apresentados todos os resultados obtidos experimentalmente nos diferentes testes, são comparados entre si e com o estudo económico, de forma a selecionar a enzima adequada para o *biopolishing* de cada fibra têxtil.

No final, no quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais da dissertação e perspetivas futuras.

## Capítulo 2. Revisão bibliográfica

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica do tema da dissertação, englobando vários tópicos relacionados com o mesmo: indústria têxtil, fibras têxteis, enzimas, *pilling*, *biopolishing* e testes de verificação da eficácia enzimática.

### 2.1. A indústria têxtil

A indústria têxtil nasce no final do século XVIII com a revolução industrial e na segunda metade do século XIX há o desenvolvimento industrial dos setores de fiação, tecelagem, tinturaria, acabamentos, malhas, têxteis-lar, têxteis técnicos, cordoarias e confeções (Direção-Geral das Atividades Económicas, 2018). Em Portugal, a indústria têxtil e de vestuário faz parte do grupo das indústrias mais antigas e tradicionais e, atualmente, desempenha um papel significativo sendo um dos maiores e mais importantes setores empresariais nacionais (Direção-Geral das Atividades Económicas, 2018).

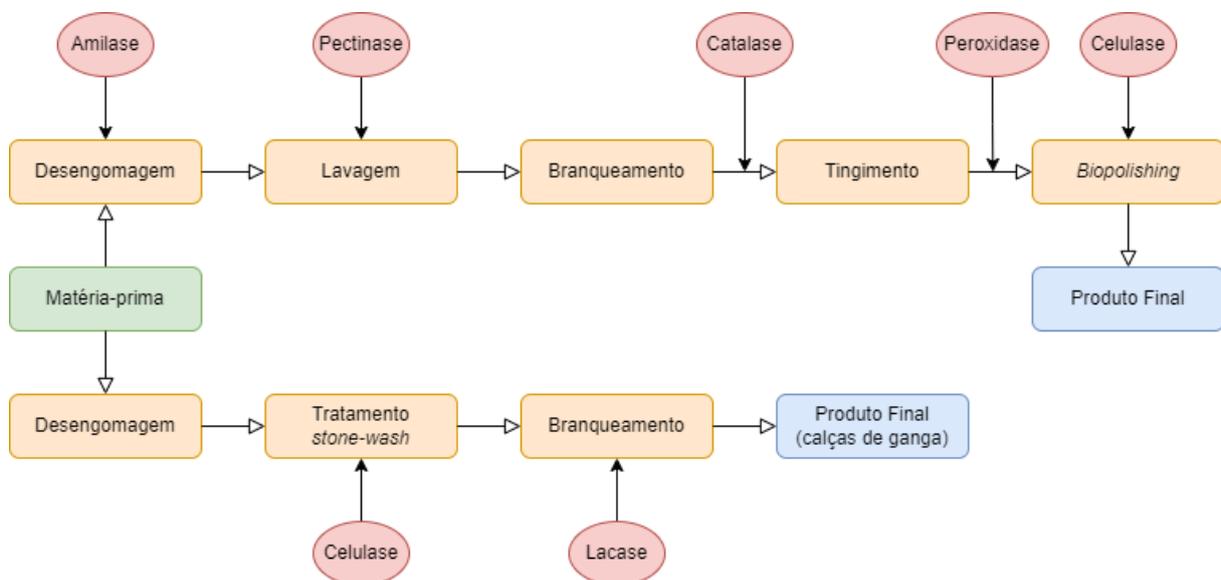
A indústria têxtil e de vestuário compreende uma série de processos, com início na fabricação de tecidos e fios, através de fibras naturais ou sintéticas, terminando com a produção de diversos produtos, como vestuário, tapetes e outros revestimentos têxteis, têxteis para o lar e têxteis técnicos (Direção-Geral das Atividades Económicas, 2018). Estes processos utilizam três tipos de fibras: fibras naturais (algodão, lã, seda, linho, cânhamo e juta); fibras regeneradas (como a viscose e o modal, resultantes da transformação de polímeros naturais); e fibras sintéticas (como a poliamida e o elastano, fibras orgânicas à base de produtos petroquímicos) (Direção-Geral das Atividades Económicas, 2018).

A indústria têxtil está em constante crescimento sendo uma das mais rápidas globalmente, produzindo uma ampla variedade de produtos têxteis envolvendo vários processos físico-químicos (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Nas últimas décadas, houve um aumento exponencial no consumo de produtos têxteis, gerando uma elevada tensão sob a esta indústria para atingir níveis altos de competitividade, eficiência, custos reduzidos e tecnologias sustentáveis, de forma a atender às necessidades dos consumidores (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

Como consequência do aumento da demanda de produtos têxteis, houve um crescimento na pesquisa e desenvolvimento de novas oportunidades na área da biotecnologia industrial, que constituíssem alternativas aos processos convencionais (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Os novos desenvolvimentos permitiram a redução do custo de fabricação e do impacto ambiental do processo produtivo, como consequência da diminuição da utilização de produtos tóxicos com custos elevados (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

Uma das principais inovações foi a utilização de enzimas em diversos processos industriais (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). O mercado global das enzimas industriais foi avaliado em 3,1 bilhões de dólares em 2009, crescendo gradualmente até 2013 onde atingiu os 4,8 bilhões de dólares (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). As enzimas técnicas, que constituem uma das partes mais importantes das enzimas industriais, são aplicadas nas indústrias de detergentes, têxtil, celulose, papel, síntese orgânica e biocombustível (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

A utilização de enzimas na indústria têxtil é um exemplo de biotecnologia industrial branca, onde há o desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis para a melhoria da qualidade do produto final (Moreira, Lo Sciuto, & Filho, 2016). Recentemente, a aplicação de enzimas na indústria têxtil tem vindo a crescer devido às suas características que permitem a substituição de produtos químicos orgânicos agressivos, mas também devido às condições de temperatura e pH necessárias para a sua atividade (Wang, Yu, & Zhong, 2012). Atualmente, as enzimas têm principal aplicação em processos para o tratamento do algodão como a desengomagem, branqueamento, *biopolishing*, lavagem e tingimento (Wang, Yu, & Zhong, 2012). A Figura 3 mostra as diferentes aplicações das enzimas no processamento têxtil.



**Figura 3:** Aplicação das enzimas na indústria têxtil. Adaptado de (Kirk, Borchert, & Fuglsang, 2002).

## 2.2. Fibras têxteis

Há mais de 10 000 anos que as fibras de origem natural são utilizadas na produção de tecidos, inicialmente recorrendo a ferramentas manuais e, depois da revolução industrial, recorrendo a máquinas mais avançadas tecnologicamente (Hearle, 2001).

Depois da revolução industrial, as fibras têxteis, como o algodão, a lã e a seda, mantiveram-se inalteradas durante mais de 100 anos, no entanto, como eram fibras curtas, estas tinham de ser aliadas em fios para a produção de tecidos, fios estes que tinham características diferentes das fibras naturais (Hearle, 2001). Com os avanços químicos, foram desenvolvidas novas fibras têxteis produzidas através da celulose, na altura conhecidas como seda artificial, sendo a mais bem sucedida a viscose, produzida pela primeira vez em 1905 (Hearle, 2001). A partir deste momento, foram desenvolvidas novas fibras sintéticas ao longo dos anos, como a poliamida e o elastano (Hearle, 2001). Na Tabela 1 estão classificadas as fibras têxteis.

**Tabela 1:** Classificação das diferentes fibras têxteis. Adaptado de (Jesus, 2011)

Fibras Naturais			Fibras Manufaturadas		Fibras Inorgânicas
Vegetal	Animal	Mineral	Polímeros Naturais	Polímeros Sintéticos	
Algodão	Lã	Amianto	Viscose	Poliamida	Metal
Linho	Seda		Liocel	Poliacrilonitrilo	Vidro
Cânhamo	Caxemira		Modal	Polipropileno	Cerâmica
Bambu	Mohair		Cupro	Polivinil	
Urtiga			Acetato	Policloreto de vinila (PVC)	
Sisal			Triacetato		
Juta			Caseína		
Banana			Soja		
Ananás			Ácido Polilático		
Côco			(PLA)		

Do ponto de vista da fibra como material, existem algumas características que são favoráveis à sua utilização (Hearle, 2001):

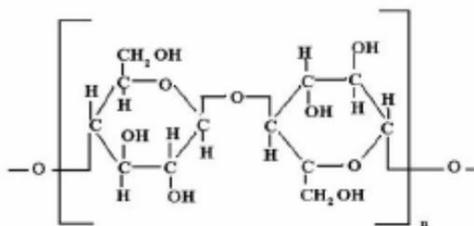
- Combinação da flexibilidade com a força;
- Espessura;
- Comprimento;
- Área superficial necessária para a absorção, no caso de têxteis mais técnicos;
- Capacidade de formar redes;
- Consistência ao longo do comprimento;
- Controlo estrutural;

- No caso de possuir defeitos, que este seja de pequenas dimensões (menor que os diâmetros da fibra);
- Capacidade de se submeter a alterações químicas e aditivos, de forma a conferir propriedades específicas;
- Controlo do desempenho do uso final.

As aplicações das fibras têxteis dividem-se em três categorias: vestuário, têxteis de decoração e têxteis técnicos (Hearle, 2001). No caso do vestuário e têxteis de decoração, o produto final pode exigir algumas características relacionadas com a cor, a textura, a cobertura, a proteção e a durabilidade (Hearle, 2001). Como tal, os principais requisitos das fibras têxteis para vestuário e para têxteis de decoração são as dimensões; a espessura; a estabilidade mecânica; térmica e química no uso diário; a disponibilidade para uso de corantes e elasticidade que permita a extensão do tecido entre 5 e 50 % (Hearle, 2001). Já no caso de têxteis técnicos, não é totalmente necessária a disponibilidade para uso de corantes, no entanto são necessárias características como resistência a temperaturas elevadas, resistência química e outras propriedades especiais dependendo da sua aplicação específica (Hearle, 2001).

### 2.2.1. Algodão

O algodão (Figura 4) é a fibra natural mais utilizada na indústria do vestuário devido às suas características, principalmente ao seu conforto e propriedades hidrofílicas, sendo responsável por quase metade da produção têxtil a nível mundial (Kumar, et al., 2020; Hearle, 2001). No entanto, como todas as fibras naturais, este possui algumas desvantagens como falta de brilho e o facto de ser propenso a encolher e enrugar, podendo tudo isto ser melhorado recorrendo a acabamentos adequados (Kumar, et al., 2020).



**Figura 4:** Estrutura química do algodão. Retirado de (Pinto, 2015).

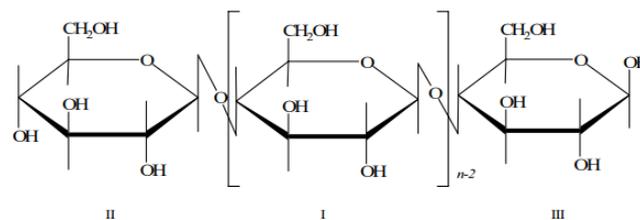
Esta fibra natural pode ser utilizada em todas as vertentes da indústria têxtil, inclusive têxteis técnicos (Hearle, 2001). No entanto, atualmente, a sua utilização é mais seletiva, nomeadamente devido ao seu conforto e sustentabilidade, na indústria do vestuário e de têxteis-lar (Hearle, 2001).

As fibras de algodão crescem a partir das várias sementes dentro da cápsula da planta, que se forma após a formação da flor (Hearle, 2001). Quando as fibras atingem a maturidade, a cápsula abre e as fibras secam, ficando assim o algodão pronto para a colheita (Hearle, 2001). Fatores ambientais e possíveis doenças levam a uma antecipação na abertura da cápsula (Hearle, 2001). No seu estado natural, a fibra de algodão possui uma cor amarelada que, após um branqueamento, passa a ser branca (Hearle, 2001).

O algodão e algumas fibras vegetais possuem uma característica pouco comum que é o facto de serem mais resistentes quando estão molhados do que quando estão secos, isto devido ao alívio das tensões internas (Hearle, 2001).

### 2.2.2. Celulose

A celulose (Figura 5) é um polímero de condensação que é encontrado nas plantas, sendo o seu principal componente estrutural (Hearle, 2001). Esta resulta da biossíntese do dióxido de carbono e da água, com a glicose como o monómero intermediário (Hearle, 2001).



**Figura 5:** Fórmula química da celulose. Retirado de (Shore, 1995).

O polímero celulose possui unidades fundamentais sendo, essencialmente, a sequência de grupos intermédios (I), o grupo terminal não-redutor (II), o grupo terminal redutor (III) (Shore, 1995).

A biossíntese da celulose ocorre nas células das plantas, em complexos enzimáticos, onde esta cristaliza como fibrilas, sendo as fibras celulósicas naturais consideradas 100 % cristalinas (Hearle, 2001). No processamento da celulose para obter celulose regenerada, aumenta a desordem material, que por sua vez aumenta a absorção de água (Hearle, 2001). Consequentemente, molhar e secar as fibras de celulose regenerada, leva à formação de vincos, podendo ser estes reduzidos recorrendo a acabamentos adequados, que por sua vez têm a desvantagem de tornar as fibras mais quebradiças e menos resistentes ao desgaste (Hearle, 2001). Por outro lado, a utilização de água facilita o tingimento e acabamentos químicos das fibras de celulose (Hearle, 2001).

### 2.2.3. Celulose regenerada

A celulose é um polímero que possui propriedades que facilitam bastante a formação de fibras, podendo originar fibras têxteis naturais e sintéticas (Ozturk & Bechtold, 2007). As fibras celulósicas sintéticas são produzidas através da celulose regenerada (Ozturk & Bechtold, 2007). Na Tabela 2, estão representadas algumas propriedades destas fibras celulósicas regeneradas (viscose, modal e liocel) em comparação com o algodão.

**Tabela 2:** Propriedades de algumas fibras celulósicas regeneradas em comparação com o algodão. Adaptado de (Andreas, Oleksyszyn, & Silveira, 2014)

Propriedade	Algodão	Viscose	Modal	Liocel
Grau de polimerização (DP)	1 600 – 2 000	300	-	600
Cristalinidade (%)	70 – 90	25	-	40
Grau de fibrilação (0 - mínimo, 6 - máximo)	2	1	-	4 – 6
Resistência a seco (cN/tex)	22	13 – 35	38 – 49	42
Resistência molhado (cN/tex)	28	7,6 – 20	27 – 38	36
Retenção de água (%)	50	90 – 110	60 – 80	65

Existem vários processos que podem dar origem a celulose regenerada, sendo que o mais comum dá origem a uma fibra sintética chamada de viscose (Ozturk & Bechtold, 2007). A viscose é produzida a partir de um xantato de celulose, sendo este um produto químico derivado da reação da celulose com dissulfeto de carbono e hidróxido de sódio (Hearle, 2001). Esta fibra regenerada é mais utilizada em produtos têxteis que não necessitem de uma resistência alta, pois a sua extensão de rutura máxima é de 20 % (Hearle, 2001).

A partir da viscose, pode-se produzir outra fibra celulósica sintética denominada modal (Ozturk & Bechtold, 2007). O modal resulta da adição de amins e outros químicos à viscose num banho de coagulação (Ozturk & Bechtold, 2007). Esta fibra regenerada possui maior resistência e um módulo de humidade melhor, comparativamente com a viscose, e um valor mínimo de tenacidade no estado molhado, com 5 % de alongamento, obtendo também propriedades mais similares às propriedades do algodão (Kumar, et al., 2020; Hearle, 2001). Por estes motivos, o modal tem vindo a aumentar o seu valor na indústria do vestuário (Kumar, et al., 2020).

O liocel, fibra celulósica regenerada, é fabricado por meio de dissolução direta de N-óxido de N-metilmorfolina que precipita a celulose (Ozturk & Bechtold, 2007; Hearle, 2001). Para além de possuir

um processo mais vantajoso a nível económico e ambiental, esta fibra também possui boas propriedades de fibrilação, ou seja, aquando da aplicação de tratamentos adequados, a separação de fibrilas finas da sua superfície ocorre facilmente proporcionando um melhor acabamento no produto final (Hearle, 2001).

### 2.3. Enzimas

As enzimas são catalisadores biológicos que, sem se alterar, aumentam a velocidade das reações químicas que ocorrem em células e organismos (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). Os reagentes participantes nas catalisações por enzimas são denominados por substratos, sendo que cada enzima tem um carácter específico, ou seja, atua sobre um determinado substrato convertendo-o num determinado produto (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003).

Como qualquer outro catalisador, uma enzima é capaz de acelerar uma reação sem se consumir, não alterando o equilíbrio químico característico desta reação (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). São capazes de operar a diferentes gamas de temperaturas, pressões e pH, pelo que são eficientes do ponto de vista energético (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003).

Na maior parte dos casos, as enzimas são proteínas com atividade catalítica (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). Proteínas são polímeros complexos, constituídos por sequências de aminoácidos ligados entre si por ligações peptídicas (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). A variedade de aminoácidos existentes e a sua combinação única é responsável pela diversidade funcional e especificidade das enzimas (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). De acordo com o tipo de reação que catalisam, as enzimas estão classificadas em seis categorias, apresentadas na Tabela 3.

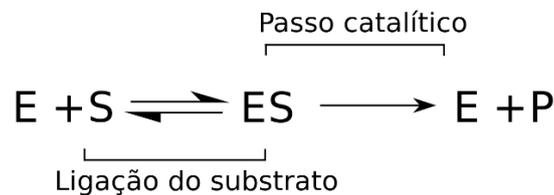
**Tabela 3:** Classificação de enzimas e tipo de reação catalisada associada. Adaptado de (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003)

Classificação	Tipo de reação catalisada
Oxido-redutases	Reações de oxidação-redução
Transferases	Transferência de um átomo ou grupo entre moléculas
Hidrolases	Reações de hidrólise
Liasas	Remoção de um grupo de uma molécula (exceto hidrólise)
Isomerasas	Reações de isomerização
Ligases	Reações de síntese associadas à hidrólise de uma molécula de ATP

O nome das enzimas é formado acrescentando o sufixo -ase ao nome dos substratos que modificam (ex: urease, tirosinase), ou ao tipo de reação que catalisam (ex: desidrogenase, descarboxilase) (Blanco & Blanco, 2017). No entanto, algumas das primeiras enzimas a terem sido descobertas e estudadas possuem nomes arbitrários (ex: pepsina, renina, tripsina) (Blanco & Blanco, 2017).

### 2.3.1. Atividade enzimática

O mecanismo associado à ação das enzimas depende da habilidade das enzimas acelerarem a velocidade da reação, diminuindo a energia de ativação (Blanco & Blanco, 2017). Durante a reação, a enzima (E) liga-se ao substrato(s) (S) e forma um complexo enzima-substrato (ES) transiente (figura 6) (Blanco & Blanco, 2017). No final da reação, os produtos são formados e a enzima continua inalterada, conseguindo ligar-se a outro substrato e ser reutilizada várias vezes (Blanco & Blanco, 2017).



**Figura 6:** Equação geral de uma reação enzimática. Retirado de (Enzima, s.d.).

A figura 7 mostra uma representação esquemática do funcionamento de uma enzima. O sítio ativo, é o local específico da enzima, onde o substrato se liga (Blanco & Blanco, 2017). A complementaridade estrutural entre a enzima e o substrato, permite uma ligação recíproca exata (Blanco & Blanco, 2017). A enzima adapta-se ao substrato através duma alteração conformacional designada ligação induzida (Blanco & Blanco, 2017). A presença no sítio ativo de aminoácidos que ligam grupos funcionais no substrato, assegura a localização adequada do substrato e a formação do complexo de transição, que será sujeito a catálise formando os produtos de reação (Blanco & Blanco, 2017).



**Figura 7:** Esquema representativo do funcionamento de uma enzima. Retirado de (Costa, s.d.).

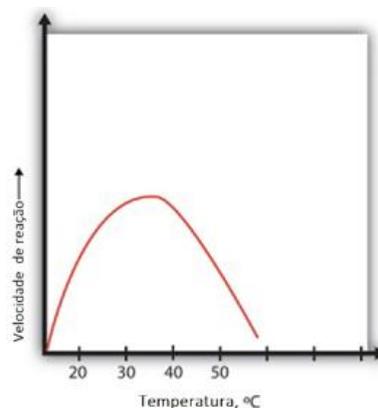
Quando as condições não são favoráveis, as enzimas sofrem desnaturação e consequente perda de atividade (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). A atividade das mesmas pode ser limitada por

alterações no pH e temperatura, bem como o uso de agentes tensioativos iônicos, já o uso de agentes humectantes não iônicos pode aumentar a sua eficiência (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Existem alguns cuidados a considerar aquando da sua utilização e deve-se ter especial atenção ao facto de as enzimas serem sensíveis à concentração de metais pesados (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

### 2.3.2. Efeito da temperatura na atividade enzimática

Uma reação enzimática pode ser descrita como uma reação química e, como tal, a sua velocidade de reação depende de vários fatores como a temperatura (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). No entanto, sendo as enzimas de origem proteica, o efeito da temperatura é mais complexo, uma vez que se a temperatura da reação for acima da temperatura de desnaturação da enzima, a estrutura terciária da enzima e a estabilidade do complexo enzima-substrato são afetados (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). Assim, a velocidade de uma reação enzimática é máxima quando se atinge a temperatura ótima para a atividade enzimática, quando é ultrapassada a temperatura ótima, a enzima desnatura e cessa a sua atividade (Figura 8).

O aumento da temperatura induz um aumento na agitação das moléculas, aumentando os choques entre enzima e substrato, o que resulta num aumento da velocidade da reação, até um certo ponto após o qual a enzima irá sofrer desnaturação (Ball, Hill, & Scott, 2020).

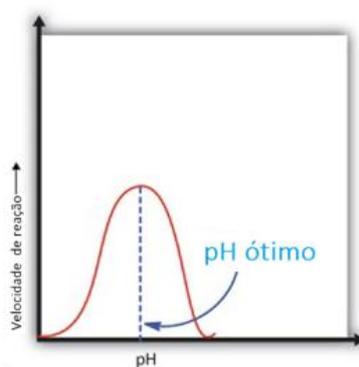


**Figura 8:** Efeito da temperatura na velocidade de uma reação enzimática. Adaptado de (Ball, Hill, & Scott, 2020).

Quando a temperatura da reação atinge a temperatura de desnaturação da enzima, esta desnatura, podendo a desnaturação ser reversível ou irreversível (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). No caso da desnaturação reversível, a enzima sofre uma desnaturação conformacional que regride quando a temperatura desce para valores abaixo da temperatura de desnaturação (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). No segundo caso, a enzima pode sofrer uma alteração conformacional ou uma alteração da sua composição química (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003).

### 2.3.3. Efeito do pH na atividade enzimática

O pH de uma reação enzimática afeta diretamente a atividade da enzima, uma vez que este determina as cargas dos aminoácidos que a constituem, sendo que uma alteração destas cargas pode levar a alterações conformacionais da enzima (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). Ainda, se o substrato possuir cargas elétricas, a aproximação do mesmo ao centro ativo da enzima vai depender da carga dos elementos envolvidos na reação (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). Assim, existe um valor de pH ótimo que torna máxima atividade enzimática e favorece a formação do complexo enzima-substrato (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003).



**Figura 9:** Efeito do pH na velocidade da reação enzimática. Adaptado de (Ball, Hill, & Scott, 2020).

A velocidade máxima da reação de uma enzima pode ser definida numa gama estreita de pH onde, para o pH ótimo, a enzima está carregada o melhor possível (Ball, Hill, & Scott, 2020). Quando o pH baixa ou aumenta para fora da gama ótima, a enzima sofre desnaturação (Ball, Hill, & Scott, 2020). Na Figura 9, está representada a variação da velocidade da reação enzimática de acordo com o pH.

Quando o pH do meio está fora da gama ótima, a enzima desnatura, podendo a desnaturação ser reversível ou irreversível (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). No primeiro caso, quando o a variação do pH não é muito distante do pH ótimo, há uma perda de atividade enzimática que é recuperável com o reajuste do pH (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003). A desnaturação irreversível é causada quando a solução se torna demasiado ácida ou básica, a enzima sofre uma perda de atividade impossível de recuperar com o reajuste do pH (Aires-Barros, Cabral, & Gama, 2003).

### 2.3.4. Aplicação na indústria têxtil

Ao longo dos anos, algumas enzimas foram inseridas na indústria têxtil substituindo os processos convencionais, como é o caso da amilase, para a remoção de amido após o processo de tecelagem; as celulases, para melhorar a suavidade e qualidade dos tecidos; as catalases, de forma a eliminar o peróxido de hidrogénio residual depois do branqueamento e no tratamento das águas residuais

provenientes da tinturaria; e as protéases, para o amaciamento e redução do efeito *pilling* na lã (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Atualmente, a tecnologia enzimática possui um papel de relevo na indústria têxtil podendo ser utilizada em todas as etapas de processamento têxtil, desde o processamento de fibras e tecidos, à lavagem e tratamento de efluentes (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

O desenvolvimento destas tecnologias aumentou o potencial da indústria têxtil na resposta às necessidades dos consumidores, sem comprometer a sustentabilidade ambiental (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Recentemente, houve um aumento no estudo de novas tecnologias baseadas na utilização de enzimas como alternativa às técnicas atualmente adotadas na indústria têxtil, o que contribuiu para a melhoria de aspetos ambientais, económicos e qualidade do produto (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

Do ponto de vista ambiental, o uso de enzimas na indústria têxtil é ecologicamente rentável uma vez que estas são altamente biodegradáveis (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). A utilização das mesmas na indústria têxtil resulta na diminuição da quantidade de produtos químicos presentes em águas residuais, como consequência da diminuição da utilização de produtos químicos nesta indústria, bem como na diminuição de utilização de água e do consumo de energia (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

### 2.3.5. Celulase

A celulase é uma enzima com propriedades hidrolíticas e é aplicada como catalisador na transformação da celulose em oligossacarídeos, e posteriormente em glicose (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Esta enzima é produzida por diversos grupos de microrganismos incluindo bactérias e fungos (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). A temperatura ideal para a atividade enzimática da celulase está situada entre os 30 e 60 °C (Araújo, Casal, & Cavaco-Paulo, 2008). Já o pH é variável, ou seja, dependendo da sensibilidade da enzima esta pode ser estável em meios ácidos ( $4,5 < \text{pH} < 5,5$ ), neutros ( $6,6 < \text{pH} < 7,0$ ) ou alcalinos ( $9,0 < \text{pH} < 10,0$ ) (Araújo, Casal, & Cavaco-Paulo, 2008).

A aplicação industrial da celulase teve início no final de 1980, como recurso no tingimento de jeans (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Atualmente, é amplamente utilizada em tratamentos na indústria têxtil, na modificação da superfície das fibras têxteis e possui um papel de relevo na lavagem da ganga como forma de obtenção do efeito *stone-washed*, excluindo a necessidade de utilização de pedras (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Para além disso, esta enzima é utilizada para melhorar a aparência e o

tato de fibras como o algodão, o linho e as estruturas tipo malha (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Assim, a celulase possui um papel de maior relevo na atribuição dos efeitos de envelhecimento e *stone-washed* aos tecidos e na limpeza e renovação da superfície de tecidos que possuem microfibras, pelos ou fibras soltas (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

Esta enzima detém uma ampla gama de aplicações no que toca a tratamentos em fibras celulósicas, como é o caso do liocel, que quando afetados pela atividade da celulase é alterada a drapeabilidade do tecido e há a remoção das fibras superficiais (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Não obstante, a aplicação da celulase na viscose contribui para a redução do seu efeito de *pilling* e no liocel reduz a sua tendência de gerar fibras (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Quando existe um pré-tratamento com celulase, há uma maior absorção de corantes naturais sem afetar a consistência (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

Dependendo do resultado pretendido, cada enzima tem uma composição diferente, por exemplo para o efeito de envelhecimento é utilizada uma preparação rica em endoglucanases, já para a obtenção de bons resultados de limpeza e remoção de borbotos são utilizados sistemas completos de celulase (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

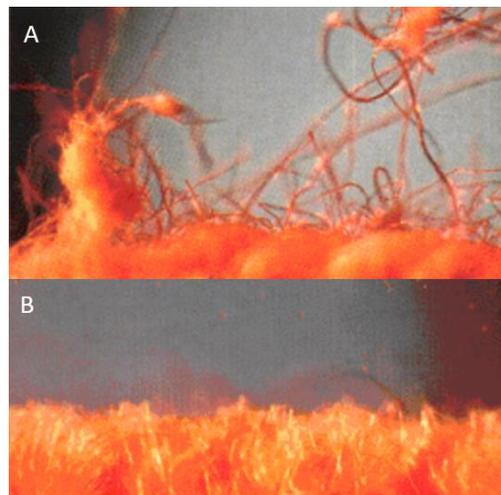
A celulase pode ser empregue num outro processo chamado *biopolishing*, contribuindo para a melhoria da qualidade das fibras celulósicas e, conseqüentemente, evitar o efeito *pilling* (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Foi verificado também que quando a celulase confere suavidade ao tecido, está a fornecer características de impermeabilidade e anti-gordura (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

## 2.4. *Pilling*

O *pilling* (Figura 10, A), vulgarmente conhecido como borbotos, é uma bola de fibras que aparece na superfície dos substratos têxteis que põe em causa a qualidade do produto, alterando a textura do mesmo e conferindo uma aparência pouco atrativa (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). Como tal, as fibras têxteis são submetidas ao processo de *biopolishing* de forma a evitar o *pilling* (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019). A remoção destas bolas de pelo tem a vantagem de conceder ao tecido uma textura mais macia e suave e uma cor brilhante (Yadav, Mishra, Singh, & Gupta, 2019).

A formação do *pilling* é um processo considerado autolimitado e inicia-se pela formação do *fuzz* (número elevado de microfibras superficiais), seguido do emaranhamento do mesmo em forma de bola (Ukponmwan, Mukhopadhyay, & Chatterjee, 2009). O *fuzz* é o resultado do aparecimento de fibras soltas

na superfície de um substrato têxtil, devido à migração progressiva das mesmas para a superfície (Ukponmwan, Mukhopadhyay, & Chatterjee, 2009). No entanto, todo este processo depende das propriedades físicas das fibras, como tenacidade e alongamento na ruptura, bem como de fatores externos como a adesão de contaminantes às fibras, o que facilita a formação do *pilling* (Ukponmwan, Mukhopadhyay, & Chatterjee, 2009). Depois da sua formação, o *pilling* cresce até ao seu tamanho máximo e, ao longo do tempo, como consequência da abrasão, pode ou não sofrer desgaste e soltar-se do produto têxtil (Ukponmwan, Mukhopadhyay, & Chatterjee, 2009). Assim, nas fibras como a lã, que possuem uma baixa resistência à ruptura das fibras superficiais por abrasão, é comum acontecer a separação do *pilling* do substrato têxtil (Ukponmwan, Mukhopadhyay, & Chatterjee, 2009). Por outro lado, no caso das fibras sintéticas com alta resistência à ruptura das fibras superficiais por abrasão, como a poliamida, esta separação já não acontece (Ukponmwan, Mukhopadhyay, & Chatterjee, 2009).



**Figura 10:** Substrato têxtil com *pilling* na superfície (A) e substrato têxtil sem *pilling* (B). Adaptado de (Dr. Petry, 2010).

Os fatores que podem influenciar o aparecimento de *pilling* são o tipo de fibra utilizada, o tipo de fio e a estrutura do tecido (Nayak & Padhye, 2015). Geralmente, estas bolas aparecem mais nas zonas sujeitas a uma elevada fricção e podem ser suavizadas pela lavagem e limpeza a seco (Nayak & Padhye, 2015). A fricção promove a aglomeração das fibras superficiais em bolas, que por sua vez estão presas ao tecido por outras fibras (Nayak & Padhye, 2015). Os tecidos produzidos com fibras naturais são menos propensos ao aparecimento de *pilling* comparativamente com os tecidos sintéticos, devido à maior resistência das fibras (Nayak & Padhye, 2015).

Inicialmente, o *pilling* era encontrado principalmente em produtos de lã, mas, atualmente, é especialmente associado a produtos que contêm poliamida na sua estrutura (Nayak & Padhye, 2015).

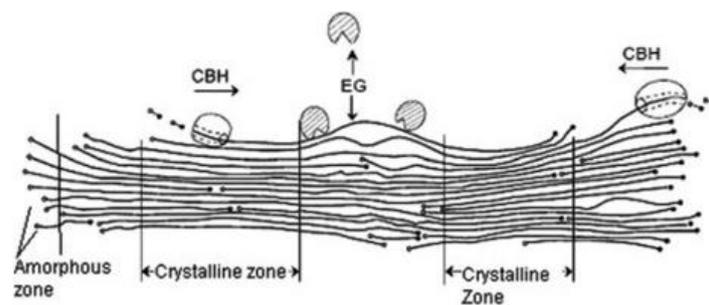
Nos produtos de algodão, a utilização de detergentes com a presença de celulase promoveu uma redução significativa do *pilling* (Nayak & Padhye, 2015).

## 2.5. *Biopolishing*

Geralmente, as matérias-primas naturais utilizadas na indústria têxtil que contêm fibras celulósicas como o algodão, o linho e o rami, são propícias ao aparecimento de microfibras e à perda de brilho após várias lavagens (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Na tentativa de aumentar o valor comercial dos tecidos, desenvolveu-se um processo de tratamento têxtil chamado de *biopolishing*, de forma a prevenir/remover as fibras celulósicas superficiais (Bhat, 2000).

O *biopolishing*, com recurso a enzimas como a celulase, hidrolisa as microfibras de celulose presentes na superfície de um substrato têxtil, uma vez que estas são suscetíveis à atividade enzimática da celulase (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Este tratamento remove as fibras superficiais, reduzindo o efeito de *pilling*, resultando num tecido mais macio e suave e na preservação do brilho e da cor (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Durante o tratamento, a celulase remove por ação mecânica as pequenas extremidades da fibra têxtil que destacam na superfície do tecido (Bhat, 2000).

A hidrólise enzimática da celulose no algodão está representada esquematicamente na Figura 11. Este processo depende da combinação das ações de três componentes enzimáticos presentes numa preparação de celulase, sendo eles as endoglucanases (EG), as celobiohidrolases (CBH) e as celobiasas (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).



**Figura 11:** Ação da celulase em algodão. Retirado de (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

A forte agitação mecânica durante o processo de *biopolishing* com celulase possui um papel significativo no que toca à atividade enzimática, podendo fazer variar as propriedades finais do substrato têxtil, devendo-se ao aumento da atividade das endoglucanases comparativamente com os outros componentes (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Assim, as características finais de uma fibra têxtil como o algodão, quando submetida a um tratamento com celulase num equipamento *jet* vão

ser melhores do que quando utilizado outro equipamento (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). A agitação mecânica de um equipamento *jet* aumenta a atividade da celulase melhorando, conseqüentemente, a remoção das fibras superficiais num tecido (Moreira, Lo Sciuto, & Filho, 2016).

Existem também alguns pré e pós-tratamentos realizados no algodão que aumentam a eficiência do *biopolishing* enzimático, tal como mergulhar o tecido em água durante algumas horas e vaporizar antes do *biopolishing*, o que aumenta a atividade hidrolítica da celulase em fibras de algodão (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

As principais enzimas utilizadas no *biopolishing* são as celulases mesofílicas, com uma temperatura ótima que ronda os 50 - 55 °C (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Um método mais simples, rápido e eficiente pode passar pela utilização de enzimas hipertermoestáveis, com uma temperatura ótima próxima dos 100 °C, no tratamento a vapor de tecidos de algodão (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016). Todavia, o *biopolishing* com celulases é realizado a temperaturas mais baixas devido à falta de disponibilidade de celulases estáveis nesta gama de temperaturas (Shahid, Mohammad, Chen, Tang, & Xing, 2016).

### 2.5.1. *Biopolishing* na Acatel

Atualmente, na Acatel, são utilizadas diferentes enzimas consoante a origem da fibra têxtil e os resultados que se pretendem em termos de limpeza de superfície dos substratos têxteis. No entanto, de um modo geral, para a maioria dos produtos é utilizada a enzima A, cuja sua designação é confidencial. Esta enzima é recomendada para o tratamento *anti-pilling* de artigos celulósicos e, na Acatel, é aplicada com uma concentração de 0,50 % por massa de substrato têxtil, durante 60 minutos a uma temperatura de 35 °C e um pH entre 4,5 – 5,0 (Aquitex, 2015).

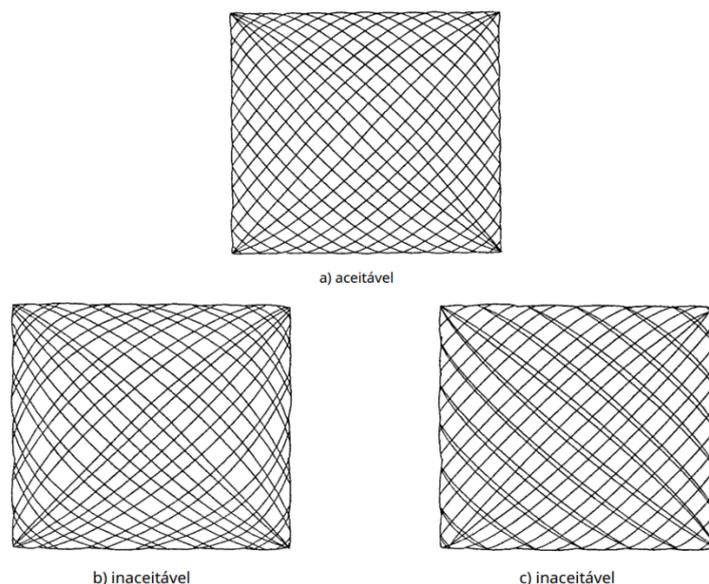
No entanto, o principal desafio por parte da empresa é a seleção de uma enzima que seja eficaz no *biopolishing* da viscose e do modal, uma vez que, atualmente, é difícil encontrar uma enzima com esse propósito. Desta forma, o estudo passa pela seleção da enzima mais adequada para o tratamento de cada uma das fibras têxteis em estudo, sendo que no caso do algodão e do liocel pretende-se uma otimização do processo já adotado. Por outro lado, no caso da viscose e do modal é necessário definir uma enzima capaz de realizar este tratamento eficazmente.

## 2.6. Testes de verificação da eficácia enzimática

De forma a aferir a eficácia da enzima utilizada no *biopolishing* de uma certa fibra têxtil, é necessário realizar alguns testes, entre eles o teste de abrasão, o teste de resistência à formação de *pilling* e o teste de rebentamento.

### 2.6.1. Teste de abrasão

No teste de abrasão recorrendo ao método de Martindale, a amostra da fibra têxtil é submetida a uma determinada pressão e é friccionada num meio abrasivo (tecido padrão), realizando um movimento transladar, de forma a traçar uma imagem de Lissajous (International Organization for Standardization, 1998). Enquanto isso, o porta-amostras (local onde está inserida a amostra ou o meio abrasivo) faz um movimento de rotação em torno do próprio eixo perpendicular ao plano horizontal (International Organization for Standardization, 1998). Durante o teste, a amostra da fibra têxtil é submetida a um desgaste abrasivo durante um determinado número de fricções (International Organization for Standardization, 1998). O número de fricções que definem um intervalo de inspeção depende do tipo de amostra e do método de avaliação (International Organization for Standardization, 1998). Tendo em conta a finalidade da amostra, esta é submetida a uma determinada pressão, ou seja, para tecidos destinados a vestuário de trabalho, estofos, roupa de cama e tecidos para uso técnico, a pressão utilizada é de 12 kPa, já para tecidos destinados ao vestuário e têxteis para o lar, excluindo estofos e cama linho, a pressão necessária é de 9 kPa (International Organization for Standardization, 2016).



**Figura 12:** Exemplos da imagem de Lissajous aceitável (a) e inaceitável (b, c). Retirado de (International Organization for Standardization, 1998).

A imagem de Lissajous (Figura 12) é uma imagem criada pelo movimento, alterando um círculo para elipses que vão ficando mais estreitas até formarem uma linha reta (International Organization for Standardization, 1998). A partir desta linha reta, são formadas elipses mais largas, numa direção oposta antes que haja a repetição do padrão (International Organization for Standardization, 1998).

O objetivo deste teste é a avaliação da resistência à abrasão da amostra, sendo esta determinada através do intervalo de inspeção até ao ponto de rutura da amostra (International Organization for Standardization, 2016). Para isso, as amostras devem ser avaliadas em intervalos quando atingido um certo número de fricções (Tabela 4) (International Organization for Standardization, 2016).

**Tabela 4:** Intervalos de avaliação para o teste de abrasão. Adaptado de (International Organization for Standardization, 2016)

Critério de intervalo de avaliação	Intervalos de avaliação (fricções)
A cada 1 000 fricções (até atingir as 6 000 fricções)	1 000 – 2 000 – 3 000 – 4 000 – 5 000 – 6 000
A cada 2 000 fricções (desde as 6 001 até às 20 000 fricções)	8 000 – 10 000 – 12 000 – 14 000 – 16 000 – 18 000 – 20 000
A cada 5000 fricções (desde as 20 001 até às 50 000 fricções)	25 000 – 30 000 – 35 000 – 40 000 – 45 000 – 50 000
A cada 10 000 fricções (acima das 50 001 fricções)	60 000 – 70 000 - ...

Nos intervalos de avaliação, a amostra deve ser avaliada tendo em conta o tipo de tecido (International Organization for Standardization, 2016). Para cada tipo de tecido há critérios relativos à quebra de fios e à área desgastada (International Organization for Standardization, 2016). Estes critérios estão expostos na secção 8, da parte 2 (Determinação da quebra da amostra) da norma ISO 12947: Têxteis – Determinação da resistência à abrasão de tecidos pelo método Martindale.

### 2.6.2. Teste de resistência à formação de *pilling*

O teste de resistência à formação de *pilling* é realizado através do método de Martindale modificado (International Organization for Standardization, 2020). Como tal, o funcionamento deste teste é similar ao funcionamento do teste de abrasão, onde a amostra da fibra têxtil é friccionada sobre uma superfície de atrito (podendo ser o mesmo tecido ou um tecido de lã abrasivo), realizando um movimento transladar, de forma a traçar uma imagem de Lissajous (International Organization for Standardization, 2020). Enquanto isso, o porta-amostras faz um movimento de rotação em torno do próprio eixo perpendicular

ao plano horizontal (International Organization for Standardization, 2020). Ao longo do teste, em determinados intervalos, é possível avaliar critérios como o *fuzzing*, o *pilling* e o *matting* descritos na parte 4 (Avaliação de *pilling*, *fuzzing* e *matting* por análise visual) da norma ISO 12945: Têxteis - Determinação da propensão do tecido à formação de *pilling*, *fuzzing* ou *matting* na superfície (International Organization for Standardization, 2020).

De forma a avaliar a resistência à formação de *pilling*, a amostra é submetida ao máximo de 7 000 fricções, no entanto, tal como no teste de abrasão, é necessário realizar intervalos de avaliação quando atingido um certo número de fricções (Tabela 5) (International Organization for Standardization, 2020).

Para determinados tecidos, este teste pode ter fim antes das 7 000 fricções, tendo em conta os critérios estipulados pelas partes interessadas (International Organization for Standardization, 2020). No entanto, são sempre necessárias 2 000 fricções no mínimo (International Organization for Standardization, 2020). Nos intervalos de avaliação, a amostra deve ser analisada visualmente tendo em conta os critérios de *pilling*, *fuzzing* e *matting* (International Organization for Standardization, 2020).

**Tabela 5:** Intervalos de avaliação para o teste de resistência à formação de *pilling*. Adaptado de (International Organization for Standardization, 2020)

Número de intervalos de avaliação	Intervalos de avaliação (fricções)
1	125
2	500
3	1 000
4	2 000
5	5 000
6	7 000

### 2.6.3. Teste de rebentamento

No teste de rebentamento pelo método pneumático, a amostra do substrato têxtil é colocada sob um diafragma expansivo e fixada através de um anel circular fixador (International Organization for Standardization, 1999). Na parte inferior do diafragma é aplicada uma pressão de ar comprimido, resultando numa distensão do diafragma e da amostra (International Organization for Standardization, 1999). De seguida, há um aumento de pressão ligeiro até ao rebentamento do substrato têxtil (International Organization for Standardization, 1999). No final do teste, são apresentados os resultados da pressão de rebentamento e da distensão da amostra (International Organization for Standardization, 1999).

## Capítulo 3. Metodologia do trabalho experimental

Ao longo do terceiro capítulo, são descritas todas as metodologias utilizadas para cumprir o principal objetivo desta dissertação. Inicialmente, foi necessário realizar uma seleção das enzimas a utilizar no estudo. De seguida, foram preparadas as amostras das fibras têxteis, foi aplicado o *biopolishing* às mesmas e procedeu-se à realização de testes laboratoriais para aferir a eficácia enzimática. Por fim, realizou-se uma análise económica ao processo para as diferentes enzimas.

### 3.1 Seleção das enzimas a estudar

A seleção das enzimas a utilizar no estudo passou por uma pesquisa bibliográfica onde foram estudados todos os potenciais fornecedores e enzimas, tendo sempre em consideração as necessidades da empresa e o objetivo do estudo.

**Tabela 6:** Enzimas selecionadas para o estudo e as suas características técnicas

Enzimas	Concentração (% m/m)	Temperatura ótima (°C)	pH ótimo	Tempo de atividade (min)	Fibras Têxteis
A	0,80 – 2,00	35	6,5	30 – 60	CO, CLY
B	0,50 – 2,00	55	5,0	30 – 60	CO, CLY
C	0,40 – 2,00	55	5,0	30 – 60	CO, CLY
D	1,00 – 6,00	55	5,0	45 – 120	CO, CLY, CV, CMD
E	0,50 – 2,00	55	5,0	30 – 60	CO, CLY
F	0,50 – 2,00	55	6,5	30 – 50	CO, CLY
G	1,00 – 1,50	55	4,5	30 – 60	CO, CLY
H	0,50 – 4,00	55	6,5	20 – 60	CO, CLY
I	3,00	55	5,0	30	CO, CLY
J	2,00 – 3,00	55	5,0	30 – 40	CO, CLY, CV, CMD
K	0,40 – 2,00	50	6,5	30 – 60	CO, CLY, CV, CMD
L	0,50 – 1,00	40	6,5	30 – 60	CO, CLY, CV, CMD
M	0,30 – 1,50	35	6,5	30 – 60	CO, CLY
N	0,40 – 1,00	55	6,0	30 – 50	CO, CLY
O	0,04 – 0,16	60	6,0	50 – 60	CO, CLY, CV, CMD

No final da pesquisa, foram selecionadas 15 enzimas com propriedades distintas (Tabela 6), dos fornecedores Aquitex, Dr. Petry, Ledechem, Quiterma e AB Enzymes. Por motivo de confidencialidade as 15 enzimas foram denominadas de A a O.

Assim, as enzimas selecionadas para o efeito estão descritas na Tabela 6, bem como algumas características como os valores ótimos de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e pH e as gamas ótimas de concentrações (% (kg de enzima/ kg de malha)) e tempo de atividade (min). Ainda, estão descritas as fibras têxteis nas quais foram aplicadas as enzimas, onde as iniciais CO, CLY, CV e CMD significam algodão, liocel, viscosa e modal, respectivamente. Tendo em conta as características de cada enzima e as recomendações dos fornecedores, todas as enzimas foram testadas no algodão e no liocel e apenas 5 foram testadas na viscosa e no modal.

### 3.2. Preparação das amostras das fibras têxteis

Neste estudo, as enzimas foram aplicadas no *biopolishing* de quatro fibras têxteis distintas: algodão, liocel, viscosa e modal. O algodão, a viscosa e o modal foram submetidos apenas a um branqueamento químico antes da aplicação do *biopolishing*. O liocel, para além do branqueamento químico, foi também tingido de maneira a avaliar este parâmetro aquando do tratamento enzimático. Depois de submetidas aos tratamentos anteriores ao *biopolishing*, as malhas foram cortadas em amostras com dimensões de 297 x 210 mm<sup>2</sup>, resultando no total de 40 amostras, sendo 15 amostras de algodão, 15 amostras de liocel, 5 amostras de viscosa e 5 amostras de modal. Cada amostra foi posteriormente submetida ao tratamento de *biopolishing*, utilizando as diferentes enzimas selecionadas. Foi cortada ainda uma amostra padrão de cada fibra têxtil, de forma a comparar os resultados que foram obtidos posteriormente.

### 3.3. Aplicação do *biopolishing*

Na aplicação do *biopolishing*, definiu-se que a concentração de enzima a utilizar seria a máxima aconselhada para cada enzima e o tempo de atividade seria o mínimo. No que diz respeito à inibição da atividade enzimática, definiu-se o mesmo critério para todas as enzimas e fibras têxteis, em que, no final de cada tratamento enzimático, aumentou-se a temperatura para 80  $^{\circ}\text{C}$  durante 15 minutos de forma a desnaturar a enzima. Todos os dados referentes à aplicação do *biopolishing* nas diferentes fibras têxteis estão apresentados no anexo I. A aplicação deste tratamento foi realizada na empresa Acatel – Acabamentos têxteis S.A., recorrendo ao equipamento representado na Figura 13.



**Figura 13:** Equipamento utilizado na aplicação do *biopolishing*.

O procedimento para a aplicação do *biopolishing* no equipamento inicia-se pela preparação do banho. Como tal, adicionam-se 2 litros de água, à temperatura de 25 °C, ao equipamento e aquece-se a mesma até se atingir o valor desejado de temperatura para o *biopolishing*. Quando for atingido o valor desejado, mede-se o pH e procede-se ao acerto do mesmo, caso necessário. De seguida, insere-se a enzima no banho, juntamente com a amostra da fibra têxtil, e inicia-se o tratamento de acordo com as condições definidas previamente. No final do *biopolishing*, de forma a inibir a atividade enzimática, aumenta-se a temperatura do banho até aos 80 °C, durante 15 minutos. No final da inibição, esvazia-se o equipamento e enche-se com 2 litros de água novamente, para uma rápida lavagem da amostra, durante 5 minutos. Por fim, retira-se a amostra do equipamento e coloca-se numa máquina secadora de tambor durante 10 minutos, para secar a amostra.

Este procedimento foi realizado para cada uma das 40 amostras separadamente, utilizando as enzimas previamente definidas para cada uma das amostras.

### 3.4. Teste de abrasão

Depois da aplicação do *biopolishing*, seguem-se os testes laboratoriais para verificar a eficácia enzimática. O teste de abrasão foi realizado na empresa Acatel – Acabamentos têxteis S.A., tendo por base a norma ISO 12947: Têxteis – Determinação da resistência à abrasão de tecidos pelo método Martindale. Como tal, os materiais necessários para a realização do mesmo são: o equipamento (Figura 14), materiais auxiliares descritos na parte 1 (Equipamento do teste de abrasão pelo método Martindale) da norma ISO 12947 e um instrumento de ampliação (fator de ampliação: 8 ou 10) para observar os fios defeituosos nos intervalos de avaliação.



**Figura 14:** Equipamento utilizado para a realização do teste de abrasão e do teste de resistência à formação de pilling.

O procedimento experimental tem início com a preparação da amostra e do meio abrasivo, onde as amostras foram cortadas em círculos com um diâmetro de 38 mm e o meio abrasivo foi cortado em círculos com um diâmetro de 140 mm. O suporte de espuma das amostras deve ter as mesmas dimensões da amostra, como tal, também foi cortado em círculos com um diâmetro de 38 mm.

De seguida, procedeu-se à colocação das amostras e do meio abrasivo no equipamento tal como descrito na parte 2 (Determinação da quebra da amostra) da norma ISO 12947, utilizando materiais de pressão sobre o corpo de prova (local onde está inserida a amostra) com um valor correspondente a 9 kPa. Quando o equipamento já estava pronto (Figura 14, lado esquerdo), selecionou-se o número de fricções para o primeiro intervalo de inspeção e iniciou-se o teste de abrasão. Os intervalos de avaliação foram realizados segundo o que está descrito na Tabela 4 presente no capítulo 2, subcapítulo 2.6, desta dissertação.

Em cada intervalo de avaliação, retirou-se o corpo de prova do equipamento, cuidadosamente, e removeram-se as fibras soltas ou detritos presentes na superfície do meio abrasivo sem danificar o mesmo. Foi examinada toda a área superficial da amostra, com recurso ao instrumento de ampliação quando necessário, de forma a verificar se existia alguma rutura. No caso de não haver rutura, o corpo de prova foi novamente colocado no equipamento e iniciou-se o seguinte intervalo de inspeção. Quando se verificou rutura na superfície da amostra, o teste de abrasão terminou.

Devido ao tamanho reduzido e à elevada quantidade de amostras, foi necessário realizar o teste de abrasão com algumas alterações da norma ISO 12947. Primeiramente, a norma aconselha a realizar pelo menos 3 ensaios relativos a cada amostra, no entanto, como as amostras das fibras têxteis tinham dimensões reduzidas, não foi possível cortar as amostras necessárias para os 3 ensaios, sendo realizado apenas 1 ensaio para cada amostra. Em segundo lugar, o teste terminou nas 12 000 fricções para todas as amostras, apesar de algumas ainda estarem em boas condições, pois o equipamento não podia ser

disponibilizado pelos longos períodos necessários para testar cada amostra até ao ponto de rutura, uma vez que era necessário testar 44 amostras.

### 3.5. Teste de resistência à formação de *pilling*

Tal como o teste de abrasão, o teste de resistência à formação de *pilling* foi realizado na empresa Acatel – Acabamentos têxteis S.A., tendo por base a norma ISO 12945: Têxteis - Determinação da propensão do tecido à formação de *pilling*, *fuzzing* ou *matting* na superfície. Como tal, os materiais necessários para a realização do mesmo são: o equipamento (Figura 14) e os materiais auxiliares descritos na parte 2 (Método de Martindale modificado) da norma ISO 12945.

Inicialmente, é necessário proceder à preparação da amostra e do meio abrasivo, onde as amostras foram cortadas em círculos com um diâmetro de 38 mm e o meio abrasivo foi cortado em círculos com um diâmetro de 140 mm. Neste caso, o meio abrasivo foi a própria amostra da fibra têxtil. O suporte de espuma das amostras deve ter as mesmas dimensões da amostra, como tal, também foi cortado em círculos com um diâmetro de 38 mm.

De seguida, procedeu-se à colocação das amostras e do meio abrasivo no equipamento tal como descrito na parte 2 da norma ISO 12945, sem utilizar materiais de pressão sobre o corpo de prova. Quando o equipamento já estava pronto (Figura 14, lado direito), selecionou-se o número de fricções para o primeiro intervalo de inspeção e iniciou-se o teste. Os intervalos de avaliação foram realizados segundo o que está descrito na Tabela 5 presente no capítulo 2, subcapítulo 2.6, desta dissertação.

Em cada intervalo de avaliação, retirou-se o corpo de prova do equipamento, cuidadosamente, e removeram-se as fibras soltas ou detritos presentes na superfície do meio abrasivo sem danificar o mesmo. Foi examinada toda a área superficial da amostra, de forma a classificar a mesma no que diz respeito à formação de *pilling*. Para tal, recorreu-se a uma escala de 1 a 5, em que 1 corresponde a uma superfície com elevada quantidade de fibras superficiais/*pilling* e 5 corresponde a uma superfície com reduzida quantidade de fibras superficiais/*pilling*. No final do intervalo de avaliação, o corpo de prova foi novamente colocado no equipamento e iniciou-se o seguinte intervalo de inspeção. O teste terminou no último intervalo de avaliação que correspondeu às 5 000 fricções.

Devido ao tamanho reduzido e à elevada quantidade de amostras, foi também necessário realizar o teste de resistência à formação de *pilling* com algumas alterações da norma ISO 12945. Primeiramente, as amostras deviam ser cortadas em círculos com diâmetro de 140 mm, no entanto, como as amostras das fibras têxteis tinham dimensões reduzidas, não foi possível cortar as mesmas com tais dimensões. Em segundo lugar, a norma aconselha a realizar pelo menos 3 ensaios relativos a cada amostra, no

entanto, como as amostras das fibras têxteis tinham dimensões reduzidas, não foi possível cortar as amostras necessárias para os 3 ensaios, sendo realizado apenas 1 ensaio para cada amostra. Por fim, o primeiro intervalo de avaliação ocorreu no final das 500 fricções, pois o equipamento não podia ser disponibilizado pelos longos períodos necessários para testar cada amostra.

### 3.6. Teste de rebentamento

O teste de rebentamento foi realizado num laboratório do Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade do Minho. Para a realização deste teste foi apenas necessário o equipamento representado na Figura 15.



*Figura 15: Equipamento utilizado para a realização do teste de rebentamento.*

Inicialmente, ligou-se o equipamento e colocou-se a amostra entre o diafragma expansivo e o anel circular. De seguida, através do computador que está ligado ao equipamento, definiram-se as unidades de cada parâmetro: o tempo em segundos, a deformação em milímetros e a pressão em kilo pascal. Definiu-se ainda uma taxa de fluxo de 80 mL/min. Por fim, iniciou-se o teste pressionando os 2 botões “Clamp sample” simultaneamente. No final do teste, obteve-se os resultados relativos aos parâmetros de tempo, distensão e pressão. O procedimento foi repetido para as 44 amostras e, de forma a obter resultados mais precisos, foram realizados 3 ensaios para cada amostra, sempre efetuados do mesmo lado da amostra.

### 3.7. Classificação do aspeto visual

O aspeto final das amostras foi classificado relativamente à quantidade de fibras superficiais. Para esse efeito, foi utilizada uma escala de 0 a 5, onde 0 corresponde a uma amostra sem fibras superficiais

e 5 corresponde a uma amostra que possui um número elevado de fibras superficiais. Este parâmetro foi avaliado visualmente, sempre pela mesma pessoa e sempre sob as mesmas condições de luminosidade.

### 3.8. Análise económica

A análise económica ao processo foi realizada através da avaliação de dois custos inerentes ao mesmo, o custo da matéria-prima e o custo energético. Foi necessário realizar alguns cálculos e algumas associações para esta análise económica, estando os mesmos apresentados no anexo II.

Relativamente ao custo da matéria-prima, foi necessário contactar os fornecedores das enzimas e questionar sobre o valor comercial das mesmas. De seguida, ajustou-se esse valor comercial ao custo associado à sua utilização no processo, relacionando o mesmo com a concentração de enzima utilizada.

No que diz respeito ao custo energético, este foi a soma do custo associado à temperatura do processo e do custo associado à duração do processo. Assim, para cada um destes custos foi elaborada uma escala, de 0 a 8 no caso da temperatura, e de 0 a 10 no caso do tempo.

## Capítulo 4. Resultados e discussão

O capítulo 4 está dividido em 6 subcapítulos, onde nos primeiros 4, são analisados os resultados obtidos nos testes realizados, para cada fibra têxtil. Nos subcapítulos 4.5. e 4.6., estão apresentadas a análise económica realizada e uma comparação final de resultados para cada fibra têxtil, respetivamente.

### 4.1. Algodão

O algodão foi submetido ao processo de *biopolishing*, utilizando 15 enzimas distintas. Como tal, as amostras com o tratamento enzimático e a amostra padrão, foram testadas laboratorialmente recorrendo aos testes: abrasão, resistência à formação do *pilling* e rebentamento. Foi ainda avaliado o aspeto visual das amostras e realizada uma análise económica ao processo. Por fim, foi realizada uma comparação final de todos os resultados para selecionar a enzima mais adequada nestas condições.

#### 4.1.1. Teste de abrasão

O teste de abrasão para as 16 amostras de algodão foi realizado até às 12 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi observada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 7. As amostras foram avaliadas com OK ou Não OK, quando não sofriam qualquer rutura ou quando foi visível pelo menos uma rutura de fios, respetivamente.

**Tabela 7:** Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de algodão

Amostra	Intervalos de avaliação								
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	8 000	10 000	12 000
Amostra padrão	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima A	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima B	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima C	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima D	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima E	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima G	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima H	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima I	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima J	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima K	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima L	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima M	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima N	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima O	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Pela análise da Tabela 7, é possível verificar que, no final das 12 000 fricções, todas as amostras se encontravam em bom estado, ou seja, não houve rutura de nenhum fio na superfície das mesmas. Assim, é possível concluir que todas as enzimas testadas foram aprovadas, para o algodão, segundo o teste de abrasão. É de salientar que, para que o teste tivesse sido realizado integralmente, todas as amostras deveriam ter rompido pelo menos 1 fio, de forma a comparar o número de fricções até à rotura de cada amostra. No entanto, como não foi possível realizar o teste na integra, todas as enzimas são aprovadas no final deste teste.

#### 4.1.2. Teste de resistência à formação de *pilling*

O teste de resistência à formação de *pilling* para as 16 amostras de algodão foi realizado até às 5 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi avaliada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão representados na Tabela 8. As amostras foram avaliadas segundo uma escala de 1 a 5, em que 1 corresponde a uma superfície com elevada quantidade de fibras superficiais/ *pilling* e 5 corresponde a uma superfície com reduzida quantidade de fibras superficiais/ *pilling*.

**Tabela 8:** Resultados obtidos no teste de resistência à formação de *pilling* nas amostras de algodão

Amostra	Intervalos de avaliação			
	500	1 000	2 000	5 000
Amostra padrão	4 - 5	4 - 5	4	3 - 4
Enzima A	4 - 5	4 - 5	4	3 - 4
Enzima B	4 - 5	4 - 5	4	3 - 4
Enzima C	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima D	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima E	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima F	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima G	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima H	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima I	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima J	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima K	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima L	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima M	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima N	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Enzima O	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4 - 5

Analisando a Tabela 8, conclui-se que, comparativamente com a amostra padrão, a maior parte das enzimas conferiu resultados melhores no que diz respeito à formação de *pilling* na superfície das amostras, ao fim das 5 000 fricções. Como o objetivo deste tratamento enzimático é a prevenção do

aparecimento de *pilling* nos produtos têxteis, as enzimas aprovadas neste teste devem conferir resultados de aparência superficial melhores do que a amostra padrão (amostra sem tratamento). Assim, as únicas enzimas que não foram aprovadas neste teste foram as enzimas A e B, pois conferiram resultados semelhantes à amostra padrão, sendo todas as outras enzimas aprovadas.

#### 4.1.3. Teste de rebentamento

O teste de rebentamento foi realizado para as 16 amostras de algodão, efetuando 3 ensaios para cada amostra. Depois de realizados os ensaios, foram calculados os valores médios de pressão de rebentamento, bem como o desvio padrão e a percentagem de perda associado aos mesmos. Os resultados obtidos de pressão média de rebentamento (PMR), desvio padrão relativo à pressão de rebentamento ( $DP_{PR}$ ) e percentagem de perda de pressão de rebentamento relativamente à amostra padrão (% de perda), estão representados na Tabela 9.

**Tabela 9:** Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de algodão

Amostras	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda
Amostra Padrão	1070,82	-	-
Enzima A	979,25	32,6	8,6
Enzima B	1009,74	17,3	5,7
Enzima C	1034,32	6,6	3,4
Enzima D	979,41	22,5	8,5
Enzima E	1012,30	17,9	5,5
Enzima F	1008,28	62,5	5,8
Enzima G	1042,11	5,7	2,7
Enzima H	1010,23	24,4	5,7
Enzima I	1048,19	19,9	2,1
Enzima J	1014,24	12,9	5,3
Enzima K	1013,27	22,9	5,4
Enzima L	999,28	39,5	6,7
Enzima M	1012,62	24,6	5,4
Enzima N	1043,36	39,2	2,6
Enzima O	956,53	14,1	10,7

Através da análise da Tabela 9, verifica-se que todas as amostras com tratamento enzimático apresentam perda de resistência, uma vez que a pressão que foi necessário exercer sobre as amostras para que estas rebentassem foi inferior à pressão exercida na amostra padrão para que esta rebentasse. Tal acontecimento era previsível, visto que a ação da celulase é consumir celulose, o que deixa as fibras celulósicas mais frágeis. O desvio padrão calculado pode ser um indicador de incongruências na limpeza no tecido, ou seja, como os resultados foram obtidos de zonas diferentes da amostra, um desvio padrão

mais elevado mostra uma maior diferença de pressões exercidas para o rebentamento da mesma amostra então, a ação da celulase foi mais eficaz em certas zonas do substrato têxtil. Assim, de forma a seleccionar as enzimas mais adequadas para o *biopolishing* do algodão, foi definido que as enzimas cujas respetivas amostras apresentaram percentagens de perda superiores a 6 %, seriam descartadas. Por fim, segundo o teste de rebentamento, as enzimas aprovadas são as enzimas B, C, E, F, G, H, I, J, K, M e N.

#### 4.1.4. Aspeto visual

O aspeto visual das amostras após o *biopolishing* foi classificado relativamente à quantidade de fibras superficiais. Para esse efeito, foi utilizada uma escala de 0 a 5, onde 0 corresponde a uma amostra sem fibras superficiais e 5 corresponde a uma amostra que possui um número elevado de fibras superficiais. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10:** *Aspeto visual final das amostras de algodão*

Amostra padrão	5
Enzima A	2
Enzima B	3
Enzima C	4
Enzima D	1
Enzima E	3
Enzima F	3
Enzima G	4
Enzima H	4
Enzima I	4
Enzima J	4
Enzima K	4
Enzima L	4
Enzima M	3
Enzima N	3
Enzima O	1

Pela análise da Tabela 10, conclui-se que todas as enzimas melhoraram o aspeto superficial do algodão a nível visual. Porém, o ideal seria a obtenção de um valor igual ou inferior a 3 na escala definida, visto que este é um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito ao consumo de produtos têxteis. Assim, todas as enzimas cujas respetivas amostras apresentaram um aspeto superior a 3 foram descartadas. Conclui-se então, que as enzimas aprovadas ao nível do aspeto visual foram as enzimas A, B, D, E, F, M, N e O.

## 4.2. Liocel

O liocel foi submetido ao processo de *biopolishing* utilizando, tal como no algodão, 15 enzimas distintas. As amostras com o tratamento enzimático e a amostra padrão, foram também testadas laboratorialmente recorrendo aos testes de abrasão, resistência à formação do *pilling* e rebentamento. Foi também avaliado o aspeto visual das amostras e realizada uma análise económica ao processo. Por fim, foi realizada uma comparação final de todos os resultados para selecionar a enzima mais adequada nestas condições.

### 4.2.1. Teste de abrasão

O teste de abrasão para as 16 amostras de liocel foi realizado até às 12 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi avaliada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 11. Tal como na secção 4.1.1., as amostras foram avaliadas com OK ou Não OK, quando não sofriam qualquer rutura ou quando foi visível pelo menos uma rutura de fios, respetivamente.

**Tabela 11:** Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de liocel

Amostra	Intervalos de avaliação								
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	8 000	10 000	12 000
Amostra padrão	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima A	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima B	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima C	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima D	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Não OK
Enzima E	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima F	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima G	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima H	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima I	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima J	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima K	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima L	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima M	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Não OK
Enzima N	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Não OK
Enzima O	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Não OK

Pela análise da Tabela 11, é possível verificar que, no final das 12 000 fricções, algumas amostras possuíam sinais de rutura de fios, sendo estas amostras tratadas com as enzimas D, M, N e O. Todas as outras amostras encontravam-se em bom estado, ou seja, não houve rutura de nenhum fio na superfície das mesmas. Assim, é possível concluir que apenas as enzimas D, M, N e O não foram

aprovadas, sendo todas as outras aprovadas segundo o teste de abrasão. É de salientar que, para que o teste tivesse sido realizado integralmente, todas as amostras deveriam ter rompido pelo menos 1 fio, de forma a comparar o número de fricções até à rotura de cada amostra.

#### 4.2.2. Teste de resistência à formação de *pilling*

O teste de resistência à formação de *pilling* para as 16 amostras de liocel foi realizado até às 5 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi avaliada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão representados na Tabela 12. As amostras foram avaliadas segundo a mesma escala utilizada na secção 4.1.2., de 1 a 5, em que 1 corresponde a uma superfície com elevada quantidade de fibras superficiais/*pilling* e 5 corresponde a uma superfície com reduzida quantidade de fibras superficiais/*pilling*.

**Tabela 12:** Resultados obtidos no teste de resistência à formação de *pilling* nas amostras de liocel

Amostra	Intervalos de avaliação			
	500	1 000	2 000	5 000
Amostra padrão	4	4	3 - 4	3 - 4
Enzima A	4	4	4	4
Enzima B	4	4	3 - 4	3 - 4
Enzima C	4	4	3 - 4	3 - 4
Enzima D	4 - 5	4 - 5	4 - 5	4
Enzima E	4 - 5	4	4	4
Enzima F	4 - 5	4	3 - 4	4
Enzima G	4 - 5	4	3 - 4	4
Enzima H	4 - 5	4	3 - 4	4
Enzima I	4 - 5	4	3 - 4	4
Enzima J	4 - 5	4	3 - 4	4
Enzima K	2 - 3	2 - 3	3	3 - 4
Enzima L	3 - 4	3 - 4	3 - 4	3 - 4
Enzima M	2 - 3	2 - 3	3	3 - 4
Enzima N	2 - 3	2	2 - 3	3
Enzima O	2 - 3	2	2 - 3	3

Analisando a Tabela 12, conclui-se que, comparativamente com a amostra padrão, algumas das enzimas conferiram melhores resultados no que diz respeito à formação de *pilling* na superfície das amostras, ao fim das 5 000 fricções. Como o objetivo deste tratamento enzimático é a prevenção do aparecimento de *pilling* nos produtos têxteis, as enzimas aprovadas neste teste devem conferir resultados de aparência superficial melhores do que a amostra padrão (amostra sem tratamento). Assim, algumas enzimas são descartadas no final deste teste pois não conseguiram melhorar este parâmetro

comparativamente à amostra padrão. Logo, as enzimas aprovadas foram as enzimas A, D, E, F, G, H, I e J, segundo o teste de resistência à formação de *pilling*. É de salientar que, algumas amostras apresentaram melhorias de resistência à formação de *pilling* ao longo dos intervalos de avaliação, tal não seria de esperar, uma vez que com o aumento do número de fricções, os tecidos têm uma maior tendência a gerar o *pilling*. Como tal, a única justificação para tal ter acontecido deve-se ao facto de as amostras não terem sido sempre avaliadas pela mesma pessoa, uma vez que o teste foi realizado por várias técnicas do laboratório da empresa.

#### 4.2.3. Teste de rebentamento

O teste de rebentamento foi realizado para as 16 amostras de liocel, efetuando 3 ensaios para cada amostra. Depois de realizados os ensaios, foram calculados os valores médios de pressão de rebentamento, bem como o desvio padrão e a percentagem de perda associado aos mesmos. Os resultados obtidos de PMR,  $DP_{PR}$  e % de perda, estão representados na Tabela 13.

**Tabela 13:** Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de liocel

Enzimas	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda
Amostra Padrão	659,75	-	-
Enzima A	643,53	53,2	2,5
Enzima B	644,14	17,5	2,4
Enzima C	614,82	13,4	6,8
Enzima D	547,37	49,6	17,0
Enzima E	625,00	27,2	5,3
Enzima F	619,76	7,5	6,1
Enzima G	613,36	15,0	7,0
Enzima H	623,74	43,0	5,5
Enzima I	657,89	10,7	0,3
Enzima J	615,43	10,5	6,7
Enzima K	636,72	11,1	3,5
Enzima L	632,09	37,7	4,2
Enzima M	625,32	0,4	5,2
Enzima N	633,55	36,2	4,0
Enzima O	631,73	19,1	4,3

Através da análise da Tabela 13, verifica-se que todas as amostras com tratamento enzimático apresentam perda de resistência, uma vez que a pressão que foi necessário exercer sobre as amostras para que estas rebentassem foi inferior à pressão exercida na amostra padrão para que esta rebentasse. Tal como no algodão, este acontecimento era previsível, visto que como explicado anteriormente na secção 4.1.3., a ação da celulase é consumir celulose, o que deixa as fibras celulósicas mais frágeis.

Assim, de forma a seleccionar as enzimas mais adequadas para o *biopolishing* do liocel, foi definido que as enzimas cujas respetivas amostras apresentaram percentagens de perda superiores a 6 %, seriam descartadas. Por fim, segundo o teste de rebentamento, as enzimas aprovadas são as enzimas A, B, E, H, I, K, L, M, N e O.

#### 4.2.4. Aspeto visual

O aspeto visual das amostras após o *biopolishing* foi classificado relativamente à quantidade de fibras superficiais. Para esse efeito, foi utilizada a mesma escala de 0 a 5 utilizada na secção 4.1.4., onde 0 corresponde a uma amostra sem fibras superficiais e 5 corresponde a uma amostra que possui um número elevado de fibras superficiais. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14:** *Aspeto visual final das amostras de liocel*

Amostra padrão	5
Enzima A	4
Enzima B	5
Enzima C	4
Enzima D	1
Enzima E	4
Enzima F	4
Enzima G	4
Enzima H	3
Enzima I	4
Enzima J	4
Enzima K	4
Enzima L	2
Enzima M	3
Enzima N	4
Enzima O	2

Pela análise da Tabela 14, conclui-se que todas as enzimas melhoraram o aspeto superficial do liocel a nível visual. Porém, o ideal seria a obtenção de um valor igual ou inferior a 3 na escala definida. Assim, todas as enzimas cujas respetivas amostras apresentaram um aspeto superior a 3 foram descartadas. Conclui-se então, que as enzimas aprovadas ao nível do aspeto visual foram as enzimas D, H, L, M e O.

#### 4.3. Viscose

A viscose foi submetida ao processo de *biopolishing*, utilizando apenas 5 das 15 enzimas seleccionadas inicialmente, uma vez que apenas 5 eram recomendadas para o seu *biopolishing*. Como tal, as amostras com o tratamento enzimático e a amostra padrão, foram também testadas laboratorialmente recorrendo

aos testes: abrasão, resistência à formação do *pilling* e rebentamento. Foi ainda avaliado o aspeto visual das amostras e realizada uma análise económica ao processo. Por fim, tal como nas secções anteriores, foi realizada uma comparação final de todos os resultados para seleccionar a enzima mais adequada nestas condições.

#### 4.3.1. Teste de abrasão

O teste de abrasão para as 6 amostras de viscose foi realizado até às 12 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi avaliada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 15. Como referenciado nas secções anteriores, as amostras foram avaliadas com OK ou Não OK, quando não sofriam qualquer rutura ou quando foi visível pelo menos uma rutura de fios, respetivamente.

**Tabela 15:** Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de viscose

Amostra	Intervalos de avaliação								
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	8 000	10 000	12 000
Amostra padrão	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima D	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima J	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima K	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima L	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima O	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Pela análise da Tabela 15, é possível verificar que, no final das 12 000 fricções, todas as amostras se encontravam em bom estado, ou seja, não houve rutura de nenhum fio na superfície das mesmas. Assim, é possível concluir que todas as enzimas testadas foram aprovadas segundo o teste de abrasão. Uma vez mais é de salientar que, para que o teste tivesse sido realizado integralmente, todas as amostras deveriam ter rompido pelo menos 1 fio, de forma a comparar o número de fricções até à rotura de cada amostra. No entanto, como não foi possível realizar o teste na íntegra, todas as enzimas são aprovadas no final deste teste.

#### 4.3.2. Teste de resistência à formação de *pilling*

O teste de resistência à formação de *pilling* para as 6 amostras de viscose foi realizado até às 5 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi avaliada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão representados na Tabela 16. As amostras foram avaliadas segundo a mesma escala de 1 a 5 referida nas secções 4.1.2. e 4.2.2., em que 1 corresponde a uma superfície com elevada quantidade de fibras

superficiais/*pilling* e 5 corresponde a uma superfície com reduzida quantidade de fibras superficiais/*pilling*.

**Tabela 16:** Resultados obtidos no teste de resistência à formação de *pilling* nas amostras de viscose

Amostra	Intervalos de avaliação			
	500	1 000	2 000	5 000
Amostra padrão	4 - 5	4	3 - 4	3
Enzima D	4 - 5	4	3 - 4	2 - 3
Enzima J	4 - 5	4	3 - 4	2 - 3
Enzima K	4 - 5	4	4	2 - 3
Enzima L	4 - 5	4	4	3
Enzima O	4 - 5	4	4	3

Analisando a Tabela 16, conclui-se que, comparativamente com a amostra padrão, nenhuma enzima conferiu resultados melhores no que diz respeito à formação de *pilling* na superfície das amostras, ao fim das 5 000 fricções. Como o objetivo deste tratamento enzimático é a prevenção do aparecimento de *pilling* nos produtos têxteis, as enzimas aprovadas neste teste devem conferir resultados de aparência superficial melhores do que a amostra padrão (amostra sem tratamento). Como tal, nenhuma enzima possui os critérios para aprovação. No entanto, foram aprovadas as enzimas que conferiram resultados semelhantes aos resultados da amostra padrão, sendo estas as enzimas L e O, na possibilidade de apresentarem bons resultados nos restantes testes.

#### 4.3.3. Teste de rebentamento

O teste de rebentamento foi realizado para as 6 amostras de viscose, efetuando 3 ensaios para cada amostra. Depois de realizados os ensaios, foram calculados os valores médios de pressão de rebentamento, bem como o desvio padrão e a percentagem de perda associado aos mesmos. Os resultados obtidos de PMR,  $DP_{PR}$  e % de perda, estão representados na Tabela 17.

**Tabela 17:** Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de viscose

Enzimas	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda
Amostra Padrão	517,12	-	-
Enzima D	491,41	18,0	5,0
Enzima J	490,03	6,8	5,2
Enzima K	461,56	43,2	10,7
Enzima L	477,29	13,0	7,7
Enzima O	478,75	11,8	7,4

Através da análise da Tabela 17, verifica-se que todas as amostras com tratamento enzimático apresentam perda de resistência, uma vez que a pressão que foi necessário exercer sobre as amostras para que estas rebentassem foi inferior à pressão exercida na amostra padrão para que esta rebentasse. Assim, de forma a selecionar as enzimas mais adequadas para o *biopolishing* da viscose, foi definido que as enzimas cujas respetivas amostras apresentaram percentagens de perda superiores a 6 %, seriam descartadas. Por fim, segundo o teste de rebentamento as enzimas aprovadas são as enzimas D e J.

#### 4.3.4. Aspeto visual

O aspeto visual das amostras após o *biopolishing* foi classificado relativamente à quantidade de fibras superficiais. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18:** *Aspeto visual final das amostras de viscose*

Amostra padrão	5
Enzima D	5
Enzima J	5
Enzima K	5
Enzima L	4
Enzima O	5

Pela análise da Tabela 18, conclui-se que nenhuma enzima melhorou significativamente o aspeto superficial da viscose a nível visual, uma vez que o ideal seria a obtenção de um valor igual ou inferior a 3 na escala definida, sendo este um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito ao consumo de produtos têxteis. Conclui-se então, que nenhuma enzima foi aprovada quanto ao aspeto visual.

#### 4.4. Modal

O modal foi submetido ao processo de *biopolishing*, utilizando apenas 5 das 15 enzimas selecionadas inicialmente, uma vez que apenas 5 eram recomendadas para o seu *biopolishing*. As amostras com o tratamento enzimático e a amostra padrão, foram também testadas laboratorialmente recorrendo aos testes de abrasão, resistência à formação do *pilling* e rebentamento. Foi ainda avaliado o aspeto visual das amostras e realizada uma análise económica ao processo. Por fim, foi realizada uma comparação final de todos os resultados para selecionar a enzima mais adequada nestas condições.

#### 4.4.1. Teste de abrasão

O teste de abrasão para as 6 amostras de modal foi realizado até às 12 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi avaliada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão expressos na Tabela 19.

**Tabela 19:** Resultados obtidos no teste de abrasão nas amostras de modal

Amostra	Intervalos de avaliação								
	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	8 000	10 000	12 000
Amostra padrão	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima D	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima J	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima K	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima L	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Enzima O	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Pela análise da Tabela 19, é possível verificar que, no final das 12 000 fricções, todas as amostras se encontravam em bom estado, ou seja, não houve rutura de nenhum fio na superfície das mesmas. Assim, é possível concluir que todas as enzimas testadas foram aprovadas segundo o teste de abrasão.

#### 4.4.2. Teste de resistência à formação do *pilling*

O teste de resistência à formação de *pilling* para as 6 amostras de modal foi realizado até às 5 000 fricções. Em cada intervalo de avaliação foi avaliada a superfície da amostra e os resultados obtidos estão representados na Tabela 20.

**Tabela 20:** Resultados obtidos no teste de resistência à formação de *pilling* nas amostras de modal

Amostra	Intervalos de avaliação			
	500	1 000	2 000	5 000
Amostra padrão	4 a 5	4	4	4
Enzima D	4 a 5	4	4	4
Enzima J	4 a 5	4	4	4
Enzima K	4 a 5	4	4	4
Enzima L	4 a 5	4	4	4
Enzima O	4 a 5	4	4	4

Analisando a Tabela 20, conclui-se que, comparativamente com a amostra padrão, nenhuma enzima conferiu resultados melhores no que diz respeito à formação de *pilling* na superfície das amostras, ao fim das 5 000 fricções. Como o objetivo deste tratamento enzimático é a prevenção do aparecimento de *pilling* nos produtos têxteis, as enzimas aprovadas neste teste devem conferir resultados de aparência

superficial melhores do que a amostra padrão (amostra sem tratamento). Como tal, nenhuma enzima possui os critérios para aprovação. No entanto, foram aprovadas todas as enzimas pois conferiram resultados semelhantes aos resultados da amostra padrão, na possibilidade de apresentarem bons resultados nos restantes testes.

#### 4.4.3. Teste de rebentamento

O teste de rebentamento foi realizado para as 6 amostras de modal, efetuando 3 ensaios para cada amostra. Os resultados obtidos de PMR,  $DP_{PR}$  e % de perda, estão representados na Tabela 21.

**Tabela 21:** Resultados obtidos no teste de rebentamento nas amostras de modal

Enzimas	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda
Amostra Padrão	479,09	-	-
Enzima D	522,23	2,5	-9,0
Enzima J	502,07	2,1	-4,8
Enzima K	489,10	14,2	-2,1
Enzima L	515,86	22,0	-7,7
Enzima O	477,70	13,8	0,3

Através da análise da Tabela 21, verifica-se que apenas uma amostra com tratamento enzimático apresenta perda de resistência, uma vez que a pressão que foi necessário exercer sobre a amostra para que esta rebentasse foi inferior à pressão exercida na amostra padrão para que esta rebentasse. Quanto às amostras que aumentaram a resistência, uma explicação possível seria o facto de que quando um tecido é sujeito a uma lavagem, as fibras podem encolher, aumentando a resistência do mesmo. Assim, de forma a seleccionar as enzimas mais adequadas para o *biopolishing* do modal, foi definido que as enzimas cujas respetivas amostras não apresentaram percentagens de perda, seriam aprovadas. Logo, segundo o teste de rebentamento apenas a enzima O foi descartada.

#### 4.4.4. Aspeto visual

O aspeto visual das amostras após o *biopolishing* foi classificado relativamente à quantidade de fibras superficiais. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 22.

Pela análise da Tabela 22, conclui-se que nenhuma enzima melhorou significativamente o aspeto superficial do modal a nível visual, uma vez que o ideal seria a obtenção de um valor igual ou inferior a 3 na escala definida, sendo este um dos parâmetros mais importantes no que diz respeito ao consumo de produtos têxteis. No entanto, foram aprovadas todas as enzimas pois melhoraram (ainda que de forma

pouco significativa) o aspeto visual do modal em comparação com a amostra padrão, na possibilidade de apresentarem bons resultados nos restantes testes.

**Tabela 22:** *Aspeto visual final das amostras de modal*

Amostra padrão	5
Enzima D	4
Enzima J	4
Enzima K	4
Enzima L	4
Enzima O	4

#### 4.5. Análise económica

A análise económica ao processo foi realizada através da avaliação de dois custos inerentes ao mesmo, o custo da matéria-prima e o custo energético. Relativamente ao custo da matéria-prima, foi realizada uma relação entre o valor comercial das enzimas e a concentração utilizada da mesma. No que diz respeito ao custo energético, este foi a soma do custo associado à temperatura do processo e do custo associado à duração do processo, sendo elaborada uma escala, de 0 a 8 no caso da temperatura e de 0 a 10 no caso do tempo. Os resultados obtidos para estes custos estão apresentados na Tabela 23.

**Tabela 23:** *Análise económica do biopolishing para cada enzima estudada*

Enzimas	Custo da matéria-prima (€/kg <sub>matéria</sub> )	Custo energético
Enzima A	0,10	8
Enzima B	0,11	12
Enzima C	0,05	12
Enzima D	-	15
Enzima E	0,06	12
Enzima F	0,08	12
Enzima G	0,05	12
Enzima H	0,13	10
Enzima I	0,10	12
Enzima J	0,16	12
Enzima K	0,03	11
Enzima L	0,02	9
Enzima M	0,04	8
Enzima N	0,03	12
Enzima O	0,01	17

A nível de análise económica, a enzima selecionada deve ser a enzima com custos de processo mais baixos. Logo, a enzima selecionada seria uma das enzimas L ou M, uma vez que são as enzimas que apresentam uma relação dos dois custos mais baixa, segundo a Tabela 23. No entanto, todos os outros fatores avaliados nos testes anteriores devem ser relacionados com a análise económica para uma melhor seleção. É de salientar que, a enzima D ainda não possui valor comercial, visto que se trata de uma enzima experimental.

#### 4.6. Comparação final

De forma a relacionar todos os parâmetros avaliados no *biopolishing* das diferentes fibras têxteis em estudo, é necessário realizar uma comparação final de todos os resultados obtidos. Assim, nas Tabelas 24, 25, 26 e 27, está representada a comparação dos resultados obtidos nos testes laboratoriais com a análise económica para o algodão, o liocel, a viscose e o modal, respetivamente. As linhas a cor cinzenta marcam as enzimas descartadas e as linhas a cor laranja mostram as enzimas selecionadas.

Relativamente ao algodão, na comparação final (Tabela 24), as enzimas foram sendo eliminadas por fases. No teste de abrasão foram todas aprovadas, já no teste de resistência à formação do *pilling* foi possível eliminar 2 enzimas que não melhoraram a mesma. De seguida, foram eliminadas todas as enzimas cujas respetivas amostras apresentaram percentagens de perda de pressão de rebentamento relativamente à amostra padrão superiores a 6 %. Por fim, todas as enzimas que conferiram um valor de aspeto superior a 3 foram descartadas e, dentro das hipóteses possíveis, foi selecionada a enzima com melhor relação de custos. Assim, a enzima selecionada para o *biopolishing* do algodão foi a enzima M.

No caso da comparação final para o liocel (Tabela 25), no teste de abrasão foram eliminadas 4 enzimas e no teste de resistência à formação do *pilling* foi possível eliminar mais 4 enzimas, uma vez que não cumpriram com os requisitos de aprovação dos testes. De seguida, foram eliminadas todas as enzimas cujas respetivas amostras apresentaram percentagens de perda de pressão de rebentamento relativamente à amostra padrão superiores a 6 %. Por fim, todas as enzimas que conferiram um valor de aspeto superior a 3 foram descartadas, sobrando apenas 1 enzima que cumpria todos os requisitos estudados. Assim, a enzima selecionada para o *biopolishing* do liocel foi a enzima H.

Quanto à viscose, na comparação final realizada (Tabela 26), no teste de abrasão todas as enzimas foram aprovadas, já no teste de resistência à formação de *pilling* só 2 enzimas foram aprovadas. Como todas as enzimas conferiram percentagens de perda de pressão de rebentamento relativamente à amostra padrão superiores a 6 % e não houve melhorias significativas no aspeto da viscose, conclui-se que nenhuma das enzimas é eficaz na aplicação do *biopolishing* na viscose.

Por fim, foi realizada a comparação final dos resultados obtidos para o modal (Tabela 27). Tanto no teste de abrasão, como no teste de resistência à formação de *pilling* todas as enzimas foram aprovadas. Como a aplicação das enzimas aumentou a resistência das amostras (com exceção da enzima O) e melhorou ligeiramente o aspeto das mesmas, o método de seleção passa por eleger a enzima com os custos mais reduzidos. Conclui-se assim que, a enzima L é a enzima mais adequada para o *biopolishing* do modal.

É de salientar que, a nível da indústria têxtil, a viscose e o modal são fibras têxteis cujo *biopolishing* não é totalmente eficaz, visto que ainda não existem enzimas capazes de realizar este tratamento com tanta eficiência como no algodão e no liocel. Sendo um dos principais desafios deste estudo a seleção de enzimas para o *biopolishing* da viscose e do modal, os resultados obtidos para a viscose foram insatisfatórios, mas espectáveis, já os resultados obtidos para o modal foram satisfatórios, mas surpreendentes.

Em suma, o estudo realizado revelou que as enzimas estáveis em meios neutros tornaram o *biopolishing* mais eficaz, uma vez que todas as enzimas seleccionadas (H, L e M) são estáveis em meios neutros (pH = 6,5). Também, a temperatura ideal de atividade enzimática recomendada pelos fornecedores das 3 enzimas seleccionadas está situada na gama ideal ( $30 < T (^{\circ}\text{C}) < 60$ ). Ainda, foi possível concluir que as enzimas seleccionadas para o algodão e o liocel eram apenas aplicáveis nestas fibras têxteis, ou seja, quando as enzimas têm uma aplicação mais alargada podem perder a eficácia. Desta forma, a tentativa de encontrar uma enzima capaz de realizar o *biopolishing* na viscose e no modal, pode retirar a eficácia da aplicação da mesma no algodão e no liocel, uma vez que ao tornar uma enzima mais agressiva, a resistência destas fibras têxteis poderá diminuir.

**Tabela 24:** Comparação final dos resultados obtidos no biopolishing do algodão

Enzimas	Abrasão	Resistência à formação de <i>pilling</i>	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda	Aspetto	Custo da matéria-prima (€/kg <sub>malha</sub> )	Custo energético
Enzima A	Aprovada	-	979,25	32,6	8,6	2	0,10	8
Enzima B	Aprovada	-	1009,74	17,3	5,7	3	0,11	12
Enzima C	Aprovada	Aprovada	1034,32	6,6	3,4	4	0,05	12
Enzima D	Aprovada	Aprovada	979,41	22,5	8,5	1	-	15
Enzima E	Aprovada	Aprovada	1012,30	17,9	5,5	3	0,06	12
Enzima F	Aprovada	Aprovada	1008,28	62,5	5,8	3	0,08	12
Enzima G	Aprovada	Aprovada	1042,11	5,7	2,7	4	0,05	12
Enzima H	Aprovada	Aprovada	1010,23	24,4	5,7	4	0,13	10
Enzima I	Aprovada	Aprovada	1048,19	19,9	2,1	4	0,10	12
Enzima J	Aprovada	Aprovada	1014,24	12,9	5,3	4	0,16	12
Enzima K	Aprovada	Aprovada	1013,27	22,9	5,4	4	0,03	11
Enzima L	Aprovada	Aprovada	999,28	39,5	6,7	4	0,02	9
Enzima M	Aprovada	Aprovada	1012,62	24,6	5,4	3	0,04	8
Enzima N	Aprovada	Aprovada	1043,36	39,2	2,7	3	0,03	12
Enzima O	Aprovada	Aprovada	956,53	14,1	10,7	1	0,01	17

**Tabela 25:** Comparação final dos resultados obtidos no biopolishing do liocel

Enzimas	Abrasão	Resistência à formação de <i>pillig</i>	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda	Aspetto	Custo da matéria-prima (€/kg <sub>malha</sub> )	Custo energético
Enzima A	Aprovada	Aprovada	643,53	53,2	2,5	4	0,10	8
Enzima B	Aprovada	-	644,14	17,5	2,4	5	0,11	12
Enzima C	Aprovada	-	614,82	13,4	6,8	4	0,05	12
Enzima D	-	-	547,37	49,6	17,0	1	-	15
Enzima E	Aprovada	Aprovada	625,00	27,2	5,3	4	0,06	12
Enzima F	Aprovada	Aprovada	619,76	7,5	6,1	4	0,08	12
Enzima G	Aprovada	Aprovada	613,36	15,0	7,0	4	0,05	12
Enzima H	Aprovada	Aprovada	623,74	43,0	5,5	3	0,13	10
Enzima I	Aprovada	Aprovada	657,89	10,6	0,3	4	0,10	12
Enzima J	Aprovada	Aprovada	615,43	10,5	6,7	4	0,16	12
Enzima K	Aprovada	-	636,72	11,1	3,5	4	0,03	11
Enzima L	Aprovada	-	632,09	37,7	4,2	2	0,02	9
Enzima M	-	-	625,32	0,4	5,0	3	0,04	8
Enzima N	-	-	633,55	36,2	4,0	4	0,03	12
Enzima O	-	-	631,73	19,1	4,3	2	0,01	17

**Tabela 26:** Comparação final dos resultados obtidos no biopolishing da viscose

Enzimas	Abrasão	Resistência à formação de <i>pilling</i>	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda	Aspetto	Custo da matéria-prima (€/kg <sub>malha</sub> )	Custo energético
Enzima D	Aprovada	-	491,41	18,0	5,0	5	-	15
Enzima J	Aprovada	-	490,03	6,8	5,2	5	0,16	12
Enzima K	Aprovada	-	461,56	43,2	10,7	5	0,03	11
Enzima L	Aprovada	Igual	477,29	13,0	7,7	4	0,02	9
Enzima O	Aprovada	Igual	478,75	11,8	7,4	5	0,01	17

**Tabela 27:** Comparação final dos resultados obtidos no biopolishing do modal

Enzimas	Abrasão	Resistência ao borboto	PMR (kPa)	$DP_{PR}$	% de Perda	Aspetto	Custo da matéria-prima (€/kg <sub>malha</sub> )	Custo energético
Enzima D	Aprovada	Igual	522,23	2,5	-9,0	4	-	15
Enzima J	Aprovada	Igual	502,07	2,1	-4,8	4	0,16	12
Enzima K	Aprovada	Igual	489,10	14,2	-2,1	4	0,03	11
Enzima L	Aprovada	Igual	515,86	22,0	-7,7	4	0,02	9
Enzima O	Aprovada	Igual	477,70	13,8	0,3	4	0,01	17

## Capítulo 5. Considerações finais e recomendações futuras

O objetivo primordial desta dissertação foi o estudo de diferentes enzimas para aplicar no *biopolishing* de quatro fibras têxteis distintas: algodão, liocel, modal e viscose. A pesquisa bibliográfica inicial permitiu a seleção das 15 enzimas, entre as quais, 15 foram aplicadas no algodão e no liocel e 5 foram aplicadas na viscose e no modal.

Para tal, na aplicação do *biopolishing*, as condições de atividade foram definidas para cada enzima e foram aplicadas de igual forma nas diferentes fibras têxteis. De forma a avaliar a eficácia enzimática neste tratamento, realizaram-se testes de abrasão, resistência à formação do *pilling* e rebentamento. Foi ainda avaliado o aspeto final das amostras a nível visual, realizada uma análise económica ao processo e uma comparação final dos resultados obtidos.

Concluiu-se que, as enzimas mais eficazes no *biopolishing* do algodão, liocel e modal foram as enzimas M, H e L, respetivamente, possuindo todas elas características de estabilidade em meios neutros. Quanto à viscose, concluiu-se que nenhuma das enzimas estudadas foi eficaz no seu *biopolishing*, o que se deve ao facto de ainda não existirem no mercado enzimas eficazes no tratamento desta fibra têxtil.

Futuramente, recomenda-se a otimização deste tratamento, estudando a utilização de diferentes valores de concentração de enzima e de tempo de aplicação, principalmente na viscose, visto que não foi possível selecionar nenhuma enzima para o *biopolishing* da mesma. Aconselha-se a realizar o *biopolishing* no algodão, viscose e modal após o tingimento, bem como realizar o *biopolishing* no liocel antes do tingimento, de forma a averiguar a influência deste tratamento sobre os resultados. Sugere-se ainda um aumento de escala, uma vez que o estudo realizado nesta dissertação foi em pequena escala, sendo aconselhada a realização do mesmo estudo em escala industrial, de forma a comprovar os resultados obtidos.

## Referências bibliográficas

- Acatel. (2022). Obtido em 11 de agosto de 2022, de Acatel: <https://acatel.pt/>
- Aires-Barros, M., Cabral, J., & Gama, M. (2003). *Engenharia Enzimática*. Lisboa: LIDEL - Edições técnicas, lda.
- Andreas, J., Oleksyszyn, D. N., & Silveira, M. H. (2014). 2. Processing of cellulosic textile materials with cellulases. *Cellulose and Other Naturally Occurring Polymers*, pp. 11-19.
- Aquitex. (2015). *Enzima A, Informação técnica*. Aquitex - Acabamentos Químicos Têxteis, S.A.
- Araújo, R., Casal, M., & Cavaco-Paulo, A. (2008). Application of enzymes for textile fibres processing. *Biocatalysis and Biotransformation*, 5(26), 332-349.
- Ball, D., Hill, J., & Scott, R. (2020). Enzyme Activity. *The Basics of General, Organic and Biological Chemistry*.
- Bhat, M. (2000). Cellulases and related enzymes in biotechnology. *Biotechnology Advances*(18), 355–383.
- Blanco, A., & Blanco, G. (2017). Enzymes. Em *Medical Biochemistry* (pp. 153-175). Academic Press.
- Costa, Y. (s.d.). *Enzimas*. (Infoescola) Obtido em 15 de janeiro de 2022, de <https://www.infoescola.com/bioquimica/enzimas/>
- Direção-Geral das Atividades Económicas. (2018). *Indústria Têxtil e Vestuário*. República Portuguesa.
- Dr. Petry. (2010). *PERIZYM IND: Biofinishing of cellulosic fabric*. Dr. Petry.
- Enzima*. (s.d.). Obtido em 14 de janeiro de 2022, de Wikipédia: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Enzima>
- Grupo Impetus. (2019). Obtido em 11 de agosto de 2022, de Impetus Group: <https://www.impetus.pt/pt/>
- Hearle, J. W. (2001). Textile Fibers: A Comparative Overview. *Encyclopedia of Materials: Science and technology*, pp. 9100-9116.
- Impetus. (2016). *Impetus underwear*. Obtido de Impetus: <https://www.impetusunderwear.com/pt/>
- International Organization for Standardization. (15 de dezembro de 1998). Part 1: Martindale abrasion testing apparatus. *ISO 12947: Textiles – Determination of the abrasion resistance of fabrics by the Martindale method*.

- International Organization for Standardization. (1 de agosto de 1999). Part 2: Pneumatic method for determination of bursting strength and bursting distension. *ISO 13938-2: Textiles - Bursting properties of fabrics*.
- International Organization for Standardization. (1 de dezembro de 2016). Part 2: Determination of specimen breakdown. *ISO 12947-2: Textiles – Determination of the abrasion resistance of fabrics by the Martindale method*.
- International Organization for Standardization. (outubro de 2020). Part 2: Modified Martindale method. *ISO 12945-2: Textiles - Determination of fabric propensity to surface pilling, fuzzing or matting*.
- Jesus, S. A. (2011). *Novas bases têxteis para novas exigências sociais: A sustentabilidade das fibras sintéticas*. Lisboa: Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Lisboa.
- Kirk, O., Borchert, T. V., & Fuglsang, C. C. (2002). Industrial enzyme applications. *Current Opinion in Biotechnology*(13), pp. 345-351. doi:10.1016/S0958-1669(02)00328-2
- Kumar, M., Shukla, S. R., A., A., Saxena, S., Patil, S., Patil, P. G., . . . Amarowicz, R. (2020). Biopolishing of Cellulosic Fabrics: A Study on Low-Stress Mechanical Properties, Microstructure, and Dye Uptake. *Fibers and Polymers*, pp. 1-12.
- Moreira, L., Lo Sciuto, D., & Filho, E. (2016). An Overview of Cellulose-Degrading Enzymes and Their Applications in Textile Industry. Em *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 165-175). Elsevier. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63507-5.00014-9
- Nayak, R., & Padhye, R. (2015). The Care of Apparel Products. Em *Textiles and Fashion* (pp. 799-822). Elsevier. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-84569-931-4.00031-3
- Ozturk, H. B., & Bechtold, T. (3 de agosto de 2007). Splitting tendency of cellulosic fibers. Part 3: splitting tendency of viscose and modal fibers. *Cellulose*, pp. 101-109.
- Pinto, L. A. (2015). *Avaliação do potencial de novos têxteis técnicos para a área biomédica*. Porto: Universidade Católica Portuguesa.
- Shahid, M., Mohammad, F., Chen, G., Tang, R.-C., & Xing, T. (1 de março de 2016). Enzymatic processing of natural fibres: white biotechnology for sustainable development. *Royal Society of Chemistry*(18), 2256-2281. doi:10.1039/c6gc00201c
- Shore, J. (1995). Cellulosics Dyeing. *Society of Dyers and Colourists*, 2-5,14-24.

- Ukponmwan, J., Mukhopadhyay, A., & Chatterjee, K. (13 de janeiro de 2009). Pilling. *Textile Progress*, 1-57. doi:10.1080/00405169808688874
- Wang, W.-m., Yu, B., & Zhong, C.-j. (22 de abril de 2012). Use of ultrasonic energy in the enzymatic desizing of cotton fabric. *Journal of Cleaner Production*(33), 179-182.
- Yadav, A., Mishra, S., Singh, S., & Gupta, A. (2019). *Recent Advancement in White Biotechnology Through Fungi, Volume 1: Diversity and Enzymes Perspectives* (Vol. 1). Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1>

## Anexos

Anexo I – Condições de aplicação das diferentes enzimas no *biopolishing* das diferentes fibras têxteis

**Tabela 28:** Condições de aplicação das diferentes enzimas no biopolishing do algodão

Enzima	Concentração de enzima (%)	$m_{malha}$ (g)	$m_{enzima\ teórica}$ (g)	$m_{enzima\ experimental}$ (g)	$T_{atividade}$ (°C)	pH	$t_{atividade}$ (min)	$T_{desnaturação}$ (°C)	$t_{desnaturação}$ (min)
Enzima A	2,00	27,96	0,6	0,54	35	6,5	30	80	15
Enzima B	2,00	24,62	0,5	0,50	55	5,0	30	80	15
Enzima C	2,00	19,98	0,4	0,47	55	5,0	30	80	15
Enzima D	6,00	22,26	1,3	1,44	55	5,0	45	80	15
Enzima E	2,00	23,60	0,5	0,51	55	5,0	30	80	15
Enzima F	2,00	20,56	0,4	0,49	55	6,5	30	80	15
Enzima G	1,50	29,18	0,4	0,43	55	4,5	30	80	15
Enzima H	4,00	21,09	0,8	0,86	55	6,5	20	80	15
Enzima I	3,00	20,57	0,6	0,65	55	5,0	30	80	15
Enzima J	3,00	31,16	0,9	0,94	55	5,0	30	80	15
Enzima K	2,00	34,15	0,7	0,74	50	6,5	30	80	15
Enzima L	1,00	26,86	0,3	0,29	40	6,5	30	80	15
Enzima M	1,50	21,03	0,3	0,30	35	6,5	30	80	15
Enzima N	1,00	26,40	0,3	0,30	55	6,0	30	80	15
Enzima O	0,16	20,02	0,1	0,10	60	6,0	50	80	15

**Tabela 29:** Condições de aplicação das diferentes enzimas no biopolishing do liocel

Enzima	Concentração de enzima (%)	$m_{malha}$ (g)	$m_{enzima\ teórica}$ (g)	$m_{enzima\ experimental}$ (g)	$T_{atividade}$ (°C)	pH	$t_{atividade}$ (min)	$T_{desnaturação}$ (°C)	$t_{desnaturação}$ (min)
Enzima A	2,00	11,83	0,2	0,22	35	6,5	30	80	15
Enzima B	2,00	12,48	0,3	0,24	55	5,0	30	80	15
Enzima C	2,00	12,42	0,3	0,24	55	5,0	30	80	15
Enzima D	6,00	12,50	0,8	0,78	55	5,0	45	80	15
Enzima E	2,00	12,94	0,3	0,31	55	5,0	30	80	15
Enzima F	2,00	13,09	0,3	0,34	55	6,5	30	80	15
Enzima G	1,50	12,19	0,2	0,18	55	4,5	30	80	15
Enzima H	4,00	13,73	0,6	0,61	55	6,5	20	80	15
Enzima I	3,00	11,86	0,4	0,43	55	5,0	30	80	15
Enzima J	3,00	12,60	0,4	0,41	55	5,0	30	80	15
Enzima K	2,00	13,60	0,3	0,30	50	6,5	30	80	15
Enzima L	1,00	11,83	0,1	0,17	40	6,5	30	80	15
Enzima M	1,50	12,83	0,2	0,22	35	6,5	30	80	15
Enzima N	1,00	12,57	0,1	0,15	55	6,0	30	80	15
Enzima O	0,16	12,61	0,1	0,04	60	6,0	50	80	15

**Tabela 30:** Condições de aplicação das diferentes enzimas no biopolishing da viscose

Enzima	Concentração de enzima (%)	$m_{malha}$ (g)	$m_{enzima\ teórica}$ (g)	$m_{enzima\ experimental}$ (g)	$T_{atividade}$ (°C)	pH	$t_{atividade}$ (min)	$T_{desnaturação}$ (°C)	$t_{desnaturação}$ (min)
Enzima D	6,00	16,95	1,0	1,02	55	5,0	45	80	15
Enzima J	3,00	16,25	0,5	0,56	55	5,0	30	80	15
Enzima K	2,00	16,59	0,3	0,40	50	6,5	30	80	15
Enzima L	1,00	16,87	0,2	0,17	40	6,5	30	80	15
Enzima O	0,16	15,94	0,1	0,05	60	6,0	50	80	15

**Tabela 31:** Condições de aplicação das diferentes enzimas no biopolishing do modal

Enzima	Concentração de enzima (%)	$m_{malha}$ (g)	$m_{enzima\ teórica}$ (g)	$m_{enzima\ experimental}$ (g)	$T_{atividade}$ (°C)	pH	$t_{atividade}$ (min)	$T_{desnaturação}$ (°C)	$t_{desnaturação}$ (min)
Enzima D	6,00	13,06	0,8	0,85	55	5,0	45	80	15
Enzima J	3,00	13,29	0,4	0,45	55	5,0	30	80	15
Enzima K	2,00	12,99	0,3	0,25	50	6,5	30	80	15
Enzima L	1,00	13,59	0,1	0,19	40	6,5	30	80	15
Enzima O	0,16	13,68	0,1	0,06	60	6,0	50	80	15

## Anexo II – Análise económica

A análise económica ao processo foi realizada através da avaliação de dois custos inerentes ao mesmo, o custo da matéria-prima e o custo energético. Para tal, foi necessário determinar os mesmos como está exemplificado a seguir.

### II.1. Custo da matéria-prima

De forma a determinar o custo da matéria-prima ( $C_{matéria-prima}$ ), foi necessário contactar os fornecedores das enzimas e questionar sobre o valor comercial das mesmas (Tabela 32), sendo que a enzima D não possui até ao momento valor comercial por se tratar de um produto experimental.

**Tabela 32:** Valor comercial das enzimas estudadas

Enzima	Valor comercial (€/kg <sub>enzima</sub> )
Enzima A	4,90
Enzima B	5,40
Enzima C	2,60
Enzima D	-
Enzima E	3,00
Enzima F	4,00
Enzima G	3,05
Enzima H	3,25
Enzima I	3,40
Enzima J	5,30
Enzima K	1,60
Enzima L	2,35
Enzima M	2,40
Enzima N	2,85
Enzima O	5,61

De seguida, ajustou-se esse valor comercial ao custo associado à sua utilização no processo, relacionando o mesmo com a concentração de enzima utilizada. Este cálculo foi efetuado de acordo com a equação (1).

$$C_{matéria-prima} = \frac{\text{Concentração (\%)}}{100} \times \text{valor comercial} \quad (1)$$

A equação (2), exemplifica o cálculo do custo da matéria-prima para a enzima A.

$$C_{matéria-prima} = \frac{2}{100} \times 4,90 = 0,10 \text{ €/kg}_{malha} \quad (2)$$

Como a concentração de cada enzima foi a mesma para todas as fibras têxteis, o custo da matéria-prima também foi o mesmo para todas as fibras têxteis.

## II.2. Custo energético

No que diz respeito ao custo energético ( $C_{energético}$ ), este foi a soma do custo associado à temperatura do processo ( $C_{temperatura}$ ) e do custo associado à duração do processo ( $C_{tempo}$ ).

Relativamente ao custo associado à temperatura do processo, foi elaborada uma escala de 0 a 8 (Tabela 33), onde 0 corresponde à temperatura de 25 °C, uma vez que esta corresponde à temperatura inicial da água, ou seja, não há gasto de energia para atingir este valor de temperatura. A partir dos 25 °C, o aumento de 5 °C tem um custo energético de 1 unidade.

**Tabela 33:** Escala do custo associado à temperatura do processo

$T_{atividade}$ (°C)	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$C_{temperatura}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8

No caso do custo associado à duração do processo, foi elaborada uma escala de 0 a 10 (Tabela 34), onde 0 corresponde à duração de 0 minutos, uma vez que apenas quando não há tratamento é que o custo energético associado a este parâmetro é nulo. Cada 5 minutos de duração do processo possuem um custo energético de 1 unidade.

**Tabela 34:** Escala do custo associado à duração do processo

$t_{atividade}$ (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$C_{tempo}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Assim, os resultados obtidos para o custo energético do processo, para cada uma das enzimas em estudo, estão representados na Tabela 35.

**Tabela 35:** Cálculo do custo energético

Enzima	$T_{atividade}$ (°C)	$C_{temperatura}$	$t_{atividade}$ (min)	$C_{tempo}$	$C_{energético}$
Enzima A	35	2	30	6	8
Enzima B	55	6	30	6	12
Enzima C	55	6	30	6	12
Enzima D	55	6	45	9	15
Enzima E	55	6	30	6	12
Enzima F	55	6	30	6	12
Enzima G	55	6	30	6	12
Enzima H	55	6	20	4	10
Enzima I	55	6	30	6	12
Enzima J	55	6	30	6	12
Enzima K	50	5	30	6	11
Enzima L	40	3	30	6	9
Enzima M	35	2	30	6	8
Enzima N	55	6	30	6	12
Enzima O	60	7	50	10	17