



Economia Circular e Análise de Ciclo de Vida: Estudo de casos na Indústria Têxtil

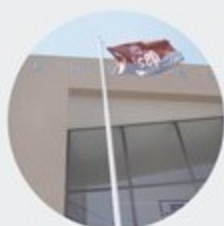
ANA SOFIA RODRIGUES DA SILVA PINTO

Setembro de 2021

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

isep



POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO
PORTO

Economia Circular e Análise de Ciclo de Vida: Estudo de casos na Indústria Têxtil

Ana Sofia Rodrigues da Silva Pinto



Est — **adalberto** — 1969

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Setembro, 2021

Candidato: Ana Sofia Rodrigues da Silva Pinto, N° 1160828,
1160828@isep.ipp.pt

Orientação Científica: António Crispim, aar@isep.ipp.pt

Empresa: Adalberto Estampados

Orientador: Hugo Miranda, hmiranda@adalberto.pt



Est — **adalberto** — 1969

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Setembro, 2021

Agradecimentos

Terminada a última etapa da minha vida académica, resta-me agradecer a todos os que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Ao Engenheiro António Crispim, orientador no Instituto Superior de Engenharia do Porto, por todo o apoio, disponibilidade e acompanhamento sempre prestados com a maior simpatia.

Ao Engenheiro Hugo Miranda, orientador na Adalberto Estampados, pelos conhecimentos transmitidos ao longo destes meses e principalmente, por me acolher da melhor maneira possível na empresa.

A todos os colaboradores da Adalberto Estampados pela partilha de conhecimentos e por me ajudarem sempre que necessitei.

Aos meus pais dedico todos os meus pequenos sucessos. Por serem um exemplo de resiliência e dedicação, por me proporcionarem os meios necessários à realização dos meus sonhos, por me darem liberdade para voar e por serem o meu modelo a seguir.

Ao meu irmão, Gonçalo, por me mostrar que se tiver força de vontade e empenho consigo fazer qualquer coisa. O meu maior motivo de orgulho.

À Andreia e à Catarina, por partilharem comigo cada momento deste percurso, pelo apoio e amizade incondicional. Não seria a mesma coisa sem vocês!

À Leonor e à Bia por terem sido as melhores colegas de casa que poderia pedir, por estarem sempre presentes, nos melhores e nos piores momentos.

A todos os meus amigos, por acreditarem em mim por estarem presentes em todas as fases da minha vida e por serem a minha segunda família.

A todos, o meu muito obrigada!

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo principal fazer a comparação entre um produto têxtil que tem por base um biopolímero, neste caso o PLA (poliácido láctico), e outro produto com base num poliéster. Para isso, foi necessário avaliar os processos de fabrico, em particular o seu impacto ambiental e a sua sustentabilidade, fazendo um levantamento das matérias-primas utilizadas, consumo de água, carga poluente, consumo de energia, agentes químicos envolvidos, entre outros.

O poliéster corresponde a uma categoria de polímeros que apresenta um grupo funcional éster na cadeia principal. A maioria dos poliésteres são termoplásticos sendo que a sua principal aplicação vai de encontro aos tecidos e malhas. Porém, este tipo de polímeros apresenta um grande problema relacionado com a reciclagem uma vez que os tecidos feitos por poliéster correspondem a uma mistura de poliéster com outras fibras. Esta mistura dificulta a separação do poliéster para posterior reciclagem do material. Outro problema, corresponde ao facto de ter por base o petróleo com o consequente impacto negativo na sustentabilidade.

Pretendeu-se com este trabalho, avaliar uma alternativa mais sustentável relativamente ao poliéster, mantendo as mesmas características do produto final ou até mesmo melhorando algumas delas.

A alternativa mais sustentável que se avaliou corresponde ao poliácido láctico, constituído por diversas cadeias de repetição de ácido láctico, que é um composto orgânico de função mista- ácido carboxílico e álcool.

Para uma análise adequada dos dois produtos é necessário avaliar o Ciclo de Vida de cada um, de modo a verificar qual o mais vantajoso para o ambiente e economia.

Em termos práticos, para avaliar o comportamento tanto do PLA como do Poliéster foram realizados tingimentos a nível laboratorial e a nível industrial. Estes tingimentos foram feitos com duas cores diferentes, o preto e o roxo. De seguida, fez-se um controlo de qualidade às amostras obtidas, sendo que se avaliou o pH, a gramagem e a diferença de cor.

Concluiu-se, pela viabilidade técnica da utilização do PLA como alternativa ao poliéster, que é necessário realizar ligeiros ajustes no processo de tingimento. Por

outro lado, a análise do ciclo de vida da fase processual estudada aponta para esta alternativa como sendo a mais sustentável.

Sugere-se ainda como alternativas de fim de vida do produto algumas práticas importantes, como a utilização de etiquetas no vestuário e a possibilidade de estudo da reciclagem do vestuário em fim de vida para a própria indústria têxtil, aplicando o princípio da economia circular.

Palavras-Chave: Sustentabilidade, Economia Circular, Análise do Ciclo de Vida, PLA, Poliéster, Biodegradabilidade.

Abstract

The main goal of the present research is to compare a textile product based on a biopolymer, in this case PLA (lactic acid polyol) and another product based on polyester. In order to do that, it was essential to evaluate the manufacturing processes as well as the environmental impact and sustainability. It was also made a survey of the raw materials used, water consumption, pollution load, energy consumption, chemical agents involved, among others.

Polyester is a category of polymers that has an ester functional group in the main chain. Most polyesters are thermoplastic and their main application is in woven and knitted fabrics. However, this type of polymers has a big problem that is related to the recycling since the fabrics made of polyester correspond to a mixture of polyester and other fibres.

In order to recycle the material, the polyester has to be separated from the mixture. Though, this separation is very hard to achieve. Another problem is that polyester is petroleum based which has negative impact on sustainability. The aim of this work is to evaluate a more sustainable alternative to polyester, maintaining the same characteristics of the final product or even improving some of them.

The most sustainable alternative that has been evaluated is lactic acid. It consists of several repeating chains of lactic acid that is an organic compound with a mixed function - carboxylic acid and alcohol.

For an accurate analysis of the two products, it is necessary to evaluate both Life Cycles in order to verify which one has more advantages for the environment and the economy.

In practical terms, to evaluate the behavior of both PLA and Polyester, dyes were carried out at laboratory level and at industrial level. These dyeings were made in two different colors: black and purple. Then, a quality control of the obtained samples was made to evaluate the pH, the grammage and the color difference.

It was concluded, by the technical viability of the use of PLA as an alternative to polyester that it is necessary to make some adjustments in the dyeing process. On the other hand, the life cycle analysis of the process phase studied points to this alternative as being the most sustainable.

It is also suggested as alternatives for the end-of-life of the product some important practices such as the use of labels on clothing and the possibility of studying the recycling of end-of-life clothing for the textile industry itself, applying the circular economy principle.

Keywords: Sustainability, Circular Economy, Life Cycle Analysis, PLA, Polyester, Biodegradability.

Índice

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Listagens	xiii
Lista de Acrónimos	xv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do trabalho	1
1.3 Apresentação da empresa	2
1.4 Organização da Dissertação	3
2 Indústria Têxtil	5
2.1 Estado Atual da Indústria	6
2.2 Tendência global do mercado	6
2.3 Impacto ambiental da Indústria Têxtil	8
2.4 O Futuro da Indústria	9
3 Processo Produtivo da Indústria Têxtil	11
3.1 Cadeia Têxtil	11
3.1.1 Fiação	12
3.1.2 Tecelagem	13
3.1.3 Ultimação	14
3.2 Matérias-primas	16
3.2.1 Fibras Têxteis	16
Fibras naturais	17
Fibras não naturais	19
Fibras sintéticas	20
3.2.2 Poliéster	22

	Poliéster biodegradável	23
3.2.3	Biopolímeros	25
	Poliácido láctico (PLA)	26
	Polibutileno Succinato (PBS)	31
3.3	Controlo de qualidade	35
3.3.1	Avaliação da diferença de cor	35
3.3.2	Avaliação da gramagem	36
3.3.3	Avaliação do pH	37
4	Economia Circular e ACV	39
4.1	Economia Circular	39
4.2	Análise do Ciclo de Vida (ACV)	42
4.2.1	Análise do Ciclo de Vida do PLA	44
	Alternativas de fim de vida	46
4.2.2	Análise do Ciclo de Vida do Poliéster	49
	Alternativas de fim de vida	51
5	Materiais e métodos	55
5.1	Substrato e produtos utilizados	55
5.2	Tingimento à escala laboratorial	56
5.2.1	Tingimento a preto em Poliéster	58
5.2.2	Tingimento a roxo em Poliéster	59
5.2.3	Tingimento a preto em PLA	60
5.2.4	Tingimento a roxo em PLA	62
5.3	Tingimento à escala industrial	63
5.3.1	Tingimento de Poliéster 100 % Reciclado	63
5.3.2	Tingimento de PLA	66
	Tingimento a preto no PLA à escala industrial	69
	Tingimento a roxo no PLA à escala industrial	71
5.4	Controlo de qualidade	72
5.4.1	Avaliação da diferença de cor	72
5.4.2	Avaliação do pH	73
5.4.3	Avaliação da gramagem	74
6	Resultados e discussão	75
6.1	Avaliação da diferença de cor	75
6.2	Avaliação do pH	77
6.3	Avaliação da gramagem	78

6.4	Microscopia das fibras	78
6.4.1	Corte Longitudinal	79
6.4.2	Corte Transversal	80
6.5	Consumos para a produção de um produto de Poliéster	81
6.6	Consumos para a produção de um produto de PLA	84
6.7	Comparação dos consumos energéticos dos dois processos produtivos	86
6.8	Alternativas de Fim de Vida	88
6.8.1	Orientação para o fim de vida do produto	88
6.8.2	Aplicação da Economia Circular	90
7	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	93
	Bibliografia	95
A	Consumos para o processo produtivo do Poliéster 100% Reciclado	101
A.1	Consumos de água	101
A.2	Consumos químicos	101
A.3	Consumos energéticos	102
A.4	Emissões de CO_2	102
B	Consumos para o processo produtivo do PLA	105
B.1	Consumos de água	105
B.2	Consumos químicos	105
B.3	Consumos energéticos	106
B.4	Emissões de CO_2	106

Lista de Figuras

1.1	Logótipo atual da empresa [1].	2
2.1	Tendências futuras para a Indústria Têxtil [8].	7
3.1	Cadeia têxtil [16].	12
3.2	Etapas de preparação à tecelagem [18].	13
3.3	Classificação das fibras têxteis [15].	17
3.4	Diferentes tipos de fibras naturais [15].	18
3.5	Diferentes tipos de fibras não-naturais [15].	20
3.6	Estrutura química do poliéster [22].	22
3.7	Biodegradação Poliéster standard e Poliéster Yarnaway [27].	25
3.8	Estrutura química do PLA [29].	26
3.9	Os três estereoisômeros do lactídeo [29].	27
3.10	Fluxograma da obtenção do PBS [43].	32
3.11	Esquema de síntese do PBS [45].	34
3.12	Coordenadas L*a*b* [48].	36
4.1	Diferentes naturezas dos fluxos de matérias gerados [50].	40
4.2	Análise do Ciclo de Vida [53].	42
4.3	Análise do Ciclo de Vida do PLA [56].	46
4.4	Biodegradação do PLA em diferentes ambientes [63].	49
5.1	Sequência de processos realizados em laboratório.	55
5.2	Máquina de pipetagem automática.	56
5.3	Máquina de Tingimento.	57
5.4	Poliéster tingido a preto em laboratório.	59
5.5	Poliéster tingido a roxo em laboratório.	60
5.6	PLA tingido a preto em laboratório.	61
5.7	Tingimento de PLA a roxo em laboratório.	62
5.8	Processo produtivo do Poliéster 100% Reciclado.	63
5.9	Processo do tingimento do poliéster, tempo em função da temperatura.	65

5.10	Poliéster tingido a preto a escala industrial.	65
5.11	Processo produtivo do PLA.	66
5.12	Máquina de preparação do artigo.	66
5.13	Máquina de tingimento, "Jet".	67
5.14	Máquina de abrir e espremer.	68
5.15	Secadeira.	68
5.16	Máquina de acabamento.	69
5.17	Processo de tingimento do PLA a preto, tempo em função da temperatura.	69
5.18	Tingimento em PLA a preto a escala industrial.	70
5.19	Processo de tingimento do PLA a roxo, tempo em função da temperatura.	71
5.20	Tingimento em PLA a roxo a escala industrial.	72
5.21	Espectrofotômetro colorimétrico.	73
5.22	Equipamento utilizado para medir o pH.	74
6.1	Avaliação do ΔE a) PLA tingido a roxo em laboratório; b) PLA tingido a roxo em produção; c) Poliéster tingido a roxo em laboratório; d) Poliéster tingido a roxo em produção; e) PLA tingido a preto em laboratório; f) PLA tingido a preto em produção; g) Poliéster tingido a preto em laboratório; h) Poliéster tingido a preto em produção.	76
6.2	Microscopia longitudinal das fibras. a) PLA tingido a roxo em laboratório; b) PLA tingido a roxo em produção; c) PLA tingido a preto em laboratório; d) PLA tingido a preto em produção; e) Poliéster tingido a roxo em laboratório; f) Poliéster tingido a roxo em produção; g) Poliéster tingido a preto em laboratório; h) Poliéster tingido a preto em produção.	79
6.3	Microscopia transversal das fibras. a) PLA tingido a roxo em produção; b) Poliéster tingido a roxo em produção.	80
6.4	Consumos relativos ao processo de produção do Poliéster 100% Reciclado.	83
6.5	Consumos relativos ao processo de produção do PLA.	86
6.6	Etiquetas de Sustentabilidade para um produto de Poliéster e outro de PLA.	89
6.7	Processo do pré-tratamento e reciclagem mecânica.	91

Lista de Tabelas

3.1	Propriedades das fibras de PLA em comparação a outras fibras [26].	33
5.1	Receita de tingimento a preto calculada para $RB= 8 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ e $m= 5\text{g}$.	58
5.2	Receita de tingimento a roxo calculada para $RB= 8 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ e $m= 5\text{g}$.	59
5.3	Receita de tingimento a preto calculada para $RB= 10 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ e $m= 5\text{g}$.	61
5.4	Receita de tingimento a roxo calculada para $RB= 10 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ e $m= 5\text{g}$.	62
6.1	Resultados obtidos para o ΔE .	76
6.2	Resultados obtidos para o pH das amostras.	77
6.3	Resultados obtidos da gramagem das diferentes amostras	78
6.4	Consumos relativos ao Tingimento de um poliéster 100% Reciclado.	82
6.5	Consumos de água, químicos e energéticos relativos ao poliéster 100% reciclado.	82
6.6	Consumos de água, químicos e energéticos relativos ao PLA.	85
6.7	Consumos monetários de água, químicos e energéticos relativos ao PLA.	85
6.8	Comparação dos consumos necessários para cada processo produtivo.	87

Lista de Acrónimos

ACV	<i>Análise do Ciclo de Vida</i>
AS	<i>Ácido Succínico</i>
ISO	<i>Organização Internacional de Normalização</i>
PET	<i>Politereftalato de Etileno</i>
PLA	<i>Poliácido Láctico</i>
POPs	<i>Poluentes Orgânicos Persistentes</i>
PS	<i>Poliestireno</i>
Tg	<i>Temperatura de transição vítrea</i>
Tm	<i>Temperatura de fusão</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo apresenta-se o enquadramento do trabalho proposto, e os objetivos do estágio desenvolvido. Para além disto, é ainda feita uma breve apresentação da empresa onde o estágio é realizado para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado e, por último, é apresentada a organização do relatório.

1.1 Enquadramento

Este trabalho é realizado no âmbito da unidade curricular Dissertação/ Estágio do curso de Mestrado em Engenharia Química do Instituto Superior de Engenharia do Porto, em parceria com a Estamparia Adalberto, e tem por tema “Economia Circular e Análise do Ciclo de Vida: Estudo de Casos na Indústria Têxtil”.

1.2 Objetivos do trabalho

O trabalho de dissertação em curso tem como objetivo principal a realização da análise do Ciclo de Vida para determinados casos na indústria têxtil e a aplicação do conceito de Economia Circular a esses casos. Em termos mais específicos, os objetivos podem sumarizar-se como segue:

- Análise do Ciclo de Vida de um processo de fabrico têxtil base biopolímero (PLA);
- Análise do Ciclo de Vida de um processo de fabrico têxtil base poliéster;
- Avaliação da aplicação do conceito de Economia Circular ao processo atual da empresa que consiste num produto base poliéster;
- Estudo de caso de aplicação da Economia Circular.

1.3 Apresentação da empresa

A origem da empresa Adalberto [1], logótipo apresentado na Figura 1.1, remonta a 1969, quando Adalberto Pinto da Silva, criou em Rebordões, Santo Tirso, uma fábrica de têxteis. A sua missão ao longo dos anos, é ser reconhecida pelas marcas líderes mundiais como o melhor parceiro de desenvolvimento de produtos de moda e têxtil lar.



Figura 1.1: Logótipo atual da empresa [1].

Os valores da empresa visam o compromisso com os resultados, a resiliência na realização dos objetivos, a honestidade nas interações, o foco no desenvolvimento pessoal e o cuidado com a sustentabilidade ambiental. A principal visão desta empresa relaciona-se com a liderança a nível europeu em design, inovação e produção nas áreas de moda e têxteis domésticos. Para alcançar estes objetivos, é necessário vender os produtos produzidos às melhores marcas mundiais, produzir com qualidade, rapidez e inovação, trabalhar em equipa e com os melhores equipamentos e parceiros do setor [1]. A Adalberto, apresenta uma rígida política de gestão, em que a empresa se compromete a diversos fatores, tais como:

- Atuar em conformidade, no sentido de ganhar e partilhar valor com todas as partes interessadas;
- Promover o talento. Desenvolver produtos e serviços de elevada qualidade e diferenciação dos demais players do mercado.

- Promover a evolução e qualificação dos colaboradores;
- Desenvolver competências e fomentar uma cultura de excelência;
- Eliminar perigos e reduzir os riscos no âmbito da segurança e saúde no trabalho, promovendo condições de trabalho seguras e saudáveis para a prevenção de lesões e problemas de saúde;
- Consultar e promover a participação dos trabalhadores, e outras partes interessadas, em matéria de segurança e saúde no trabalho.
- Entre outros [2].

Esta empresa com grande valor europeu, emprega cerca de 400 colaboradores e apresenta duas áreas bem distintas de negócio, os têxteis lar e os artigos de moda, sempre com a perspetiva de serem líderes na área de estampagem, tingimento e acabamento em qualquer tipo de tecido. A maioria das vendas são realizadas no mercado europeu devido à proximidade e necessidade das marcas europeias adquirirem produtos de valor acrescentado.

A Adalberto Estampados tem a competência de sobressair das restantes empresas, graças a dois fatores de grande qualidade e inovação:

- **Design Interno:** Apresenta uma equipa comercial e de design de elevada qualidade, que cria e desenha grande parte dos estampados em parceria com os clientes.
- **Estamparia Digital:** A introdução da estamparia digital proporcionou uma vantagem competitiva muito elevada. A Adalberto tem a máquina de estamparia digital mais avançada do mundo (pike), sendo que apenas existem três instaladas a nível mundial, na Adalberto, na China e Alemanha.

1.4 Organização da Dissertação

O presente relatório encontra-se dividido em 7 capítulos. Após este capítulo introdutório, o segundo capítulo apresenta uma visão da indústria têxtil no seu estado atual e as perspetivas de futuro. O terceiro capítulo relaciona-se com o processo produtivo da indústria têxtil, onde se desenvolve o tema da cadeia têxtil e das diversas matérias-primas utilizadas ao longo deste trabalho. No capítulo 4, apresentam-se os temas de Economia Circular e de Análise do Ciclo de Vida. De seguida, no capítulo 5, apresentam-se os estudos realizados na empresa Adalberto Estampados, para um

produto de PLA e outro de Poliéster Reciclado. No capítulo 6 faz-se a discussão dos resultados obtidos. Por fim, o capítulo 7 destina-se às conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Indústria Têxtil

O presente capítulo tem como objetivo fazer uma abordagem ao estado atual e futuro da indústria têxtil, as respectivas tendências globais do mercado e o impacto ambiental que esta apresenta.

Na Europa, a Indústria Têxtil tem vindo a sofrer mudanças radicais ao longo dos anos, devido às mudanças tecnológicas, evoluções nos diferentes custos de produção e à emergência de importantes concorrentes internacionais. As empresas foram-se tornando mais competitivas, reduzindo assim a produção em grandes quantidades, de modo a se focarem numa ampla variedade de produtos com maior valor acrescentado [3].

Esta indústria apresenta uma grande representatividade na estrutura industrial nacional e desde muito cedo adotou um papel de relevo em termos de emprego e peso na economia do país. Corresponde a um setor maduro, fragmentado e sujeito a desajustes periódicos entre a oferta e a procura, onde o bom desempenho se encontra totalmente dependente das flutuações da atividade económica mundial [3]. As empresas do setor têxtil apresentam produtos com um ciclo de vida relativamente curto tendo a necessidade de desenvolver produtos e processos rápidos, flexíveis e com uma grande diferenciação [4].

2.1 Estado Atual da Indústria

O setor têxtil realizou nas últimas décadas um percurso de inovação notável até à atualidade, baseado principalmente nos fatores seguintes:

- **Comércio eletrônico:** Tecnologia para a troca direta de informação padronizada entre computadores utilizando as telecomunicações [5].
- **Produção:** A produção de têxteis tem notado a introdução de tecnologias que permitem poupar significativamente em mão-de-obra, tais como o manuseamento de pré-produção automática, a tecnologia de malha para estruturas em 3 dimensões que não requerem costuras, tecnologias de inspeção de qualidade, entre outras [5].
- **Diferenciação do Produto:** Apesar do aumento dos pontos de venda de produtos *standard* orientados para grandes quantidades, verifica-se por parte dos clientes uma tendência contrária, caracterizada por uma procura de produtos não *standard*, tendo como consequência uma alteração rápida da moda [5].
- **Logística:** Existe um aumento de empresas que utilizam TIC (Tecnologias de Informação e Comunicação) para gerir o seu *stock*. Alguns vendedores têm o *stock* reduzido praticamente a zero. Por outro lado, outras indústrias exigem que a mercadoria seja entregue com base no *Just in Time*. Estas duas estratégias estão direcionadas para a redução do *stock* dentro da cadeia de oferta, o que pode apresentar problemas para repor o produto, quando aparecem problemas paralelos [5].

2.2 Tendência global do mercado

A população europeia compra, em média, 6,4 milhões de toneladas de novas roupas, o que equivale a cerca de 12,66 kg por cada cidadão. O aumento do consumo que se tem vindo a verificar ao longo dos anos levou, conseqüentemente, ao aumento do desperdício. Cerca de 30% das peças de roupa armazenadas em casas, apresenta uma média de utilização de um ano. Quando descartado, mais de metade do vestuário não é valorizado e acaba em incineradoras ou aterros [6].

A indústria têxtil, devido ao tingimento e tratamento dos diferentes têxteis, contribui com 20% para a poluição da água, sendo também a maior responsável pela introdução de plástico nos oceanos, devido à utilização das microfibras de plásticos

libertadas nas lavagens de têxteis que têm por base poliéster, poliamida, entre outros [7].

A utilização do poliéster implica uma menor necessidade de utilização de água, comparativamente ao algodão, lavagens a menores temperaturas, secagens mais rápidas e pode ser reciclado em novas fibras cruas. Por outro lado, a utilização do poliéster liberta milhares de microfibras de plástico para o ambiente e oceanos e a sua degradação leva centenas de anos [7].

Neste âmbito e segundo a Indústria 4.0, as principais tendências futuras consideradas para a indústria têxtil e vestuário são as que se encontram na Figura 2.1:

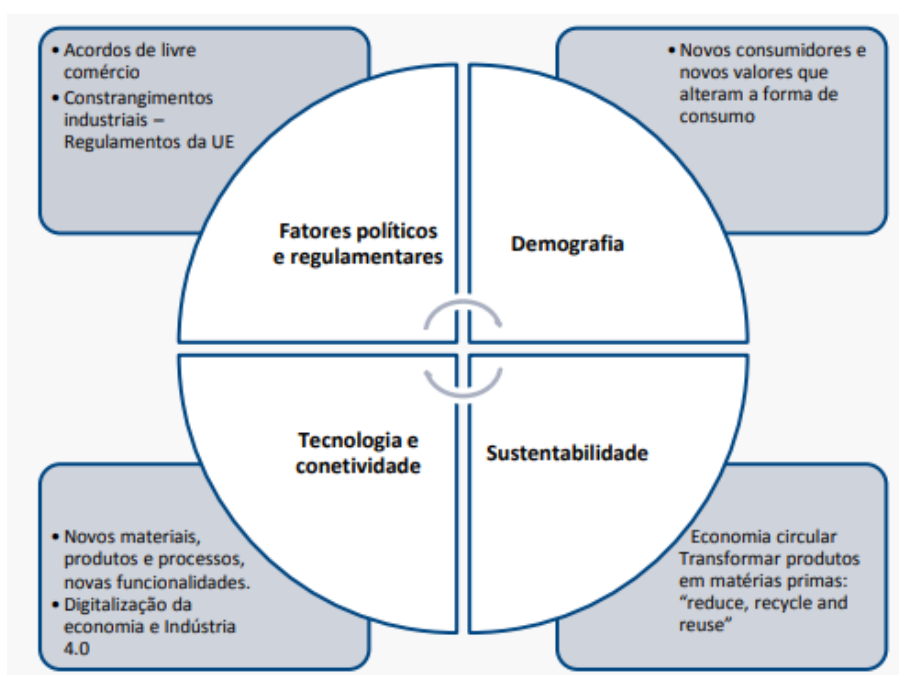


Figura 2.1: Tendências futuras para a Indústria Têxtil [8].

Assim, os fatores a ter em conta nas tendências futuras deste setor, são os políticos e regulamentares, a demografia, a tecnologia e conectividade e por fim a sustentabilidade.

A Indústria 4.0, consiste na fusão de métodos de produção com os mais recentes desenvolvimentos na tecnologia de informação e comunicação. Este desenvolvimento é conduzido pela tendência de digitalização da economia e da sociedade e assenta em "sistemas ciber-físicos", sistemas inteligentes e interligados que vão permitir que as pessoas, máquinas, equipamentos, sistemas logísticos e produtos comuniquem e cooperem diretamente uns com os outros [8].

Assim, a Indústria 4.0 pode ser definida como uma nova configuração de organização e controlo sobre toda a cadeia de valor e ciclo de vida dos produtos, tendo a capacidade de atender clientes cada vez mais individualizados [9].

Deste modo, o futuro dos têxteis será marcado pelas tendências da ciência, comércio, negócio, arte, cultura, comunicações, política, entre outros. Nestas condições, as tendências futuras no desenvolvimento dos têxteis parecem bastantes lógicas:

- O mercado têxtil é cada vez mais global;
- As economias desenvolvidas devem-se concentrar no desenvolvimento e produção de produtos de valor acrescentado personalizados, inovadores e sofisticados. Para isto, é necessário ocorrerem mudanças radicais na forma como os produtos são desenvolvidos, produzidos e comercializados;
- O desenvolvimento de produtos têxteis é multidisciplinar, e por isso, existe a necessidade de trabalho em equipa. Produtos que apresentam um valor acrescentado, sofisticados e inovadores, devem alcançar a excelência na combinação da estética com a funcionalidade;
- Materiais baseados em fibras apresentam propriedades bastante únicas, tais como a flexibilidade, conformabilidade, elevada resistência, entre outras. Por este motivo, são continuamente investigadas novas aplicações inovadoras;
- Produtos têxteis ativos e multifuncionais devem substituir os produtos mais tradicionais. O vestuário poderá estimular, monitorizar e controlar funções vitais, contribuindo para melhorias significativas da qualidade de vida [10].

2.3 Impacto ambiental da Indústria Têxtil

Atualmente, cada vez mais existe uma consciencialização sobre os problemas que afetam o meio ambiente, sendo este um fator determinante para a compatibilização da expansão dos meios de produção de acordo com as condições ambientais ideais. Relativamente aos aspetos ambientais, a responsabilidade social das diversas empresas deveria ter em conta a eliminação e redução dos efeitos negativos do processo de produção e preservação dos recursos naturais, principalmente os não renováveis, através da implementação de tecnologias mais eficientes [11].

Os gastos com a proteção ambiental começam a ser vistos pelas empresas líderes, não apenas como custos, mas também como investimentos no futuro e, paradoxalmente, como uma vantagem competitiva. A incorporação do conceito de desenvolvimento sustentável no meio empresarial pode, caso não se reverta, pelo menos abrandar a degradação do meio ambiente ao longo dos anos.

Na indústria têxtil, torna-se indispensável a valorização da reciclagem dos resíduos dos polímeros, uma vez que o seu processo de decomposição natural é muito longo e crítico ao equilíbrio ecológico. Neste sentido, é importante salientar o interesse do uso consciente dos materiais poliméricos através de soluções criativas e efetivas como a reciclagem, o reprocessamento e a reutilização dos resíduos das resinas plásticas [11].

Posto isto, é cada vez mais importante optar por alternativas sustentáveis, tal como a utilização de biopolímeros em substituição dos polímeros tradicionais [11].

2.4 O Futuro da Indústria

Nos últimos anos, o aumento do preço do petróleo e também por motivos de sustentabilidade, tem provocado a intensificação de projetos de investigação, com o objetivo de obter produtos alternativos ao plástico convencional. Ultimamente, plásticos biodegradáveis começam a ser produzidos tanto para uso industrial como comercial, deixando de ser utilizado apenas para projetos de investigação [12].

Os novos desenvolvimentos nos têxteis passam pelos fatores seguintes:

- **Têxteis Técnicos:** O mercado para os têxteis e produtos têxteis na UE é bastante diversificado, apesar de estar dominado pela compra de artigos de têxteis lar. É provável que nos mercados emergentes possa crescer a procura de têxteis e de vestuário, bem como de produtos técnicos para mercados industriais crescentes, tanto na UE como no exterior. O alargamento, com o investimento adicional em infraestruturas, ajudará a aumentar a procura dos têxteis técnicos para a reestruturação e desenvolvimento de projetos. Para conseguirem atingir este potencial, as empresas devem adotar diversas medidas, tais como a oferta *Just in Time*, a oferta competitiva, realizar investigação e desenvolvimento para todos os setores, criar patentes e licenças de produtos, e adotar normas ambientais e de qualidade [13].
- **Diversificação:** A diversificação para novas áreas tem impacto na indústria, implicando a aquisição de requisitos de novos mercados, métodos de acesso

ao mercado, normas, compromissos de investigação e desenvolvimento e requisitos de competências [13].

Assim, cada vez mais, os consumidores finais estão mais conscientes do conceito de sustentabilidade, e por isso, começam a exigir das diversas marcas, produtos e processos mais sustentáveis, obrigando assim, as indústrias a tornarem-se também mais sustentáveis de forma a conseguir dar resposta às marcas. Existe também uma grande tendência de mercado por produtos reciclados, ecológicos, biodegradáveis e sem a libertação de microplásticos.

Capítulo 3

Processo Produtivo da Indústria Têxtil

No presente capítulo irá ser abordado o processo produtivo da Indústria Têxtil, bem como a sua cadeia de valor e as matérias-primas necessárias para o processo.

3.1 Cadeia Têxtil

O processo de produção na indústria têxtil é um processo sequencial, em que diversas etapas se articulam de forma mecânica. Esta articulação proporciona várias combinações de muitas etapas do processo de produção numa mesma planta industrial ou várias unidades fabris [14].

O processo de produção têxtil passou por inúmeras modificações ao longo do tempo, tendo sido implementadas inovações tecnológicas que possibilitaram torná-lo mais eficiente e eficaz.

A produção têxtil inicia-se com a produção ou colheita de fibras em quantidades elevadas. A fibra utilizada nos têxteis pode ser obtida a partir de fontes naturais, tais como lã e algodão, ou fabricadas a partir de materiais celulósicos, tal como o acetato de celulose ou o lyocell. Pode ainda ser obtida através de métodos totalmente

sintéticos, como por exemplo o poliéster e o nylon [15]. As fibras, de seguida, são sujeitas a quatro fases principais de processamento:

1. Produção do fio;
2. Produção do tecido;
3. Ultimação;
4. Fabrico [15].

Na Figura 3.1, encontra-se representado de uma forma esquemática os processos referidos anteriormente até dar origem ao produto, ou seja, a cadeia têxtil.

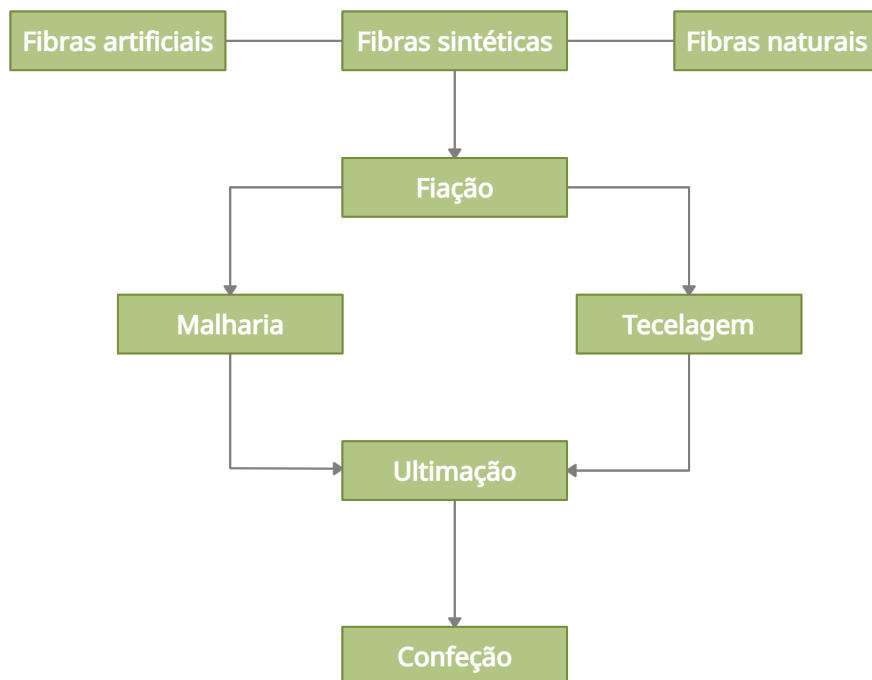


Figura 3.1: Cadeia têxtil [16].

As diversas etapas do processo produtivo encontram-se integradas dentro de um macroprocesso e ocorrem de forma interligada num microprocesso. Estas etapas contêm várias operações internas que, num todo, resultam na aquisição do produto final em cada etapa [16].

3.1.1 Fiação

Relativamente à produção do fio, ou fiação, as fibras naturais, predominantemente algodão e lã, vão ser limpas, cardadas, penteadas e de seguida fiadas em fio. As

fibras celulósicas e as sintéticas são enviadas como fibras curtas, semelhantes ao algodão ou à lã, que são fiadas através de um processo semelhante.

A fiação do fio têxtil, constitui um processo de energia intensiva, e o consumo de energia depende diretamente do tamanho do fio e da técnica de fiação. Os fios mais finos necessitam de maior consumo de energia e os mais grossos de menor. A fiação por anéis favorece um fio liso com boa resistência ao *peeling* e muita força, mas implica maior consumo de energia. Por outro lado, a fiação a céu aberto (rotor), oferece um fio mais áspero e com menos força, com um consumo de energia menor. A fiação através de um jato de ar é uma tecnologia ainda em crescimento apresentando um bom desempenho e baixo consumo de energia. O desperdício do processo de fiação dos fios está diretamente relacionado com a qualidade do material e das fibras sendo que este pode variar entre 0,5% e 22% [17].

3.1.2 Tecelagem

A segunda etapa, a produção de tecido, relaciona-se com a tecelagem. Nesta, os fios de teia e de trama são entrelaçados formando o tecido. Os fabricantes dos tecidos de malha também consomem uma quantidade considerável de fibras. Os tecidos de malha são normalmente classificados como malhas de trama (malha circular) ou malha de urdidura (malha plana) [15].

Neste processo, os fios de urdume, antes de serem processados no tear passam por uma série de operações que se denominam de preparação à tecelagem, tal como se representa na Figura 3.2.

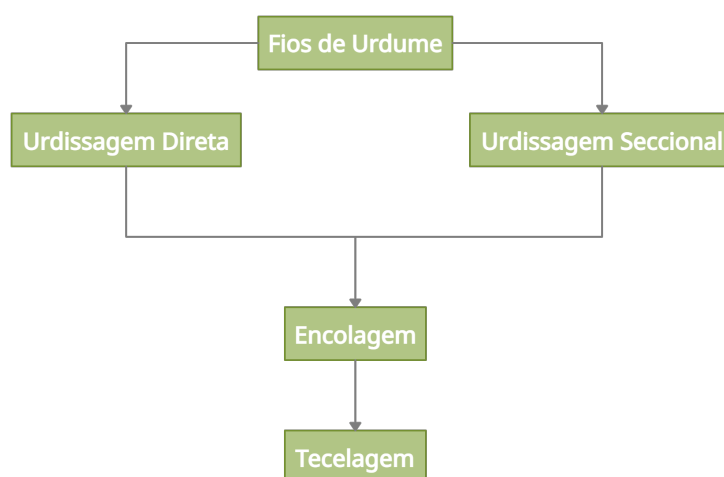


Figura 3.2: Etapas de preparação à tecelagem [18].

A urdissagem é a operação de preparação à tecelagem, que corresponde à passagem de fios que irão formar o urdume do tecido, transferindo os fios do seu suporte inicial, como os cones e bobinas para o rolete do tear. Este rolete, é constituído por um cilindro que apresenta dois discos nas suas extremidades que se dominam de flanges e que determinam a largura sobre a qual vão ser enrolados os fios de urdume [18].

Relativamente à urdissagem, esta pode ser de dois tipos, direta ou seccional. A urdissagem seccional, é utilizada para a produção de urdume com poucos metros e com fios retorcidos, uma vez que o rolo que sai desta urdideira contém todos os fios de urdume. A urdissagem direta, é efetuada diretamente sobre os rolos, chamados de rolos primários, devendo-se então urdir um número de rolos primários cujo número de fios somados indique o número total de fios do rolo de urdume. Este tipo de urdissagem é adequado para urdumes com muitos metros. O processo de urdissagem direta é relativamente mais simples do que o seccional [18].

A encolagem tem como objetivo revestir os fios de urdume com uma substância que aglutina as fibras ou filamentos e protege também os fios do contacto com o tear. Assim, este método consiste em aplicar sobre os fios uma película que irá conferir, condições mais favoráveis para o tecimento. Os dois parâmetros mais importantes a considerar neste método, são a resistência à tração e à abrasão. Assim, a aplicação de produtos para encolar o fio tem como principal objetivo promover a adesão das fibras para evitar o deslizamento entre elas, aumentando assim a resistência à tração e promover o revestimento dos fios com uma película elástica de modo que não perca a sua elasticidade [18].

Assim, a tecelagem consiste no entrelaçamento de dois sistemas de fios, que se entrelaçam num ângulo recto um no outro [19].

3.1.3 Ultimeção

A ultimeção corresponde à terceira etapa. A grande parte dos tecidos largos retêm a cor natural das fibras a partir das quais têm origem. Os tecidos de algodão, nesta fase, são dados como “*gray goods*” e os sintéticos são conhecidos como “*greige*” [20].

O processo de ultimeção pode ser dividido em duas fases: a ultimeção primária e a final. A primeira fase, corresponde à correção de defeitos, eliminação de impurezas e melhoria das propriedades dos produtos para o acabamento final. As operações que envolvem esta etapa são o branqueamento, chamuscagem e purga.

Relativamente à ultimação final, realizam-se diferentes operações tais como o tingimento, estampagem e outros acabamentos finais [20].

As operações de acabamento têm como objetivo proporcionar ao produto têxtil características como estabilidade dimensional, resistência à formação de rugas, maciez, entre outras [20].

De seguida encontra-se a descrição de cada operação que se realiza na ultimação:

- **Chamuscagem/ Gasagem:** Realiza-se a queima dos fios que estão na superfície do tecido com o objetivo de permitir um processo de estampagem mais uniforme.
- **Desencolagem:** Operação para eliminar o agente encolante. Esta etapa tem de ocorrer visto que a goma interfere e impede alguns processos.
- **Mercerização/ Caustificação:** A mercerização baseia-se no tratamento de artigos de algodão e outras fibras naturais compostas por celulose com uma solução de soda cáustica concentrada, sob tensão e à temperatura ambiente. A diferença entre mercerização e caustificação, consiste no fato de esta última trabalhar a uma menor concentração de base, sendo executada sem tensão, num equipamento como o *Jigger*. Por outro lado, a mercerização é efetuada sob tensão num equipamento específico.
- **Branqueamento:** Baseia-se na adição de agentes químicos que reagem com compostos de cores da fibra, tornando-a assim sem cor. Os branqueamentos são necessários principalmente no processo de tecidos que serão tingidos com cores de tonalidade clara ou que serão estampados.
- **Termofixação:** Esta operação destina-se a fixar as dimensões de um artigo. Um artigo não fixado, pode sofrer alterações dimensionais, encolhimento e enrugamento durante a lavagem, tingimento, estamparia, entre outros.
- **Tingimento:** Corresponde ao processo de coloração dos substratos têxteis, de modo homogêneo, através da aplicação de corantes. Existem dois processos diferentes de tingimento, por esgotamento e por impregnação seguida de fixação. No tingimento por esgotamento existe a possibilidade de redistribuir o tinto entre as fibras uma vez que todo o material se encontra exposto uma ou mais horas. Neste caso há a oportunidade de corrigir um tingimento não uniforme. Por outro lado, no tingimento por impregnação, a impregnação tem que ser uniforme visto que a cor é fixa onde foi aplicada.

- **Estampagem:** Ocorre a aplicação de pigmentos nos tecidos. São usados cilindros perfurados com os diferentes padrões que se deseja estampar e é por aí que o pigmento passa para que se reproduza nas superfícies dos tecidos.
- **Acabamento:** Este processo é realizado após o tingimento ou estampagem, com o objetivo de tornar o substrato têxtil mais adequado tendo em conta o fim pretendido.

Os acabamentos químicos conferem características finais ao tecido como, maior estabilidade, melhorias de aspeto e toque ou aumento da resistência. Por outro lado, os acabamentos mecânicos dos tecidos relacionam-se com as operações de cardação, laminagem, calandragem, encolhimento por compressão e secagem [20].

Por último, o tecido acabado é fabricado apresentando uma variedade de vestuário, produtos domésticos e industriais [15].

3.2 Matérias-primas

As matérias-primas consideradas e trabalhadas nesta dissertação foram o PLA e o Poliéster. Ao longo deste subcapítulo vai ser abordado também o PBS uma vez que apresenta características semelhantes ao PLA e pode ser usado com o mesmo propósito que este.

3.2.1 Fibras Têxteis

As fibras que originam o material têxtil podem ser constituídas por materiais com diferentes fontes. Estas podem ser classificadas em dois grandes grupos, fibras têxteis naturais e fibras têxteis não naturais. As fibras naturais são as que a natureza faculta ao Homem e, por outro lado, as fibras não naturais são todas as fibras produzidas por processos químicos, a partir de polímeros naturais ou de polímeros obtidos por síntese química, ou seja sinteticamente, ou até de origem inorgânica. Primeiramente, utilizaram-se as fibras da natureza e com a evolução da indústria e da tecnologia, desenvolveram-se novas fibras com origem em processos químicos [15].

Na Figura 3.3 encontra-se a divisão das fibras têxteis em fibras naturais e fibras não naturais.

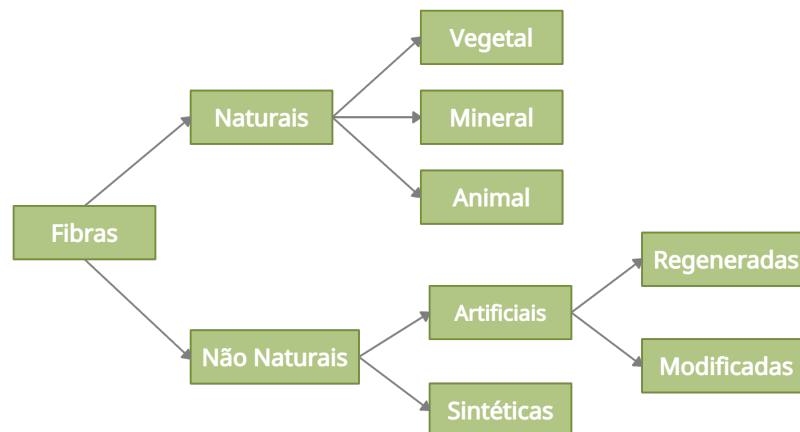


Figura 3.3: Classificação das fibras têxteis [15].

Tal como se pode observar pela Figura 3.3, as fibras têxteis naturais podem ter origem vegetal, animal ou mineral. Por outro lado, as fibras não naturais podem ser artificiais ou sintéticas, sendo que as artificiais podem ser regeneradas ou modificadas.

As fibras têxteis têm de ser suficientemente fortes para manter a sua forma, flexíveis o suficiente para serem moldadas e duráveis o suficiente para resistirem o mesmo tempo que o substrato têxtil. As fibras têxteis têm de ter no mínimo 5 milímetros de comprimento para poderem ser fiadas em conjunto.

Fibras naturais

As fibras naturais são produzidas pela natureza de forma que estejam aptas para o processamento têxtil.

Na Figura 3.4, encontra-se a divisão esquemática das fibras naturais. Estas dividem-se em três subgrupos, tendo em conta a sua origem, podendo ser fibras de origem vegetal, quando extraídas das plantas, fibras de origem animal, quando são obtidas a partir dos animais, quer através dos pelos de mamíferos, quer pela secreção glandular das larvas de alguns insetos e por último fibras de origem mineral, quando são provenientes de rochas e com estrutura fibrosa.

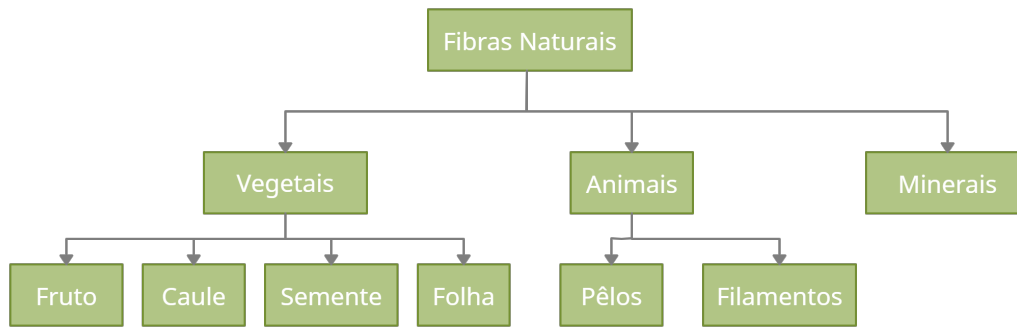


Figura 3.4: Diferentes tipos de fibras naturais [15].

Para o fabrico de têxteis são utilizados dois tipos de fibras, as naturais e as sintéticas. As fibras naturais devem ser abertas, misturadas, cardadas, penteadas e por último, fiadas em fio. Estas fibras, realizadas pelo Homem são normalmente comercializadas prontas para fiar. De seguida, apresentam-se as principais etapas utilizadas para o processamento de lã e do algodão. Apesar dos equipamentos utilizados para produzir lã e algodão serem diferentes, as máquinas operam de forma idêntica [15].

- **Abertura:** As fibras naturais são entregues à fábrica de fiação em compridos fardos. As fibras devem ser classificadas tendo em conta a classe e a limpeza, de modo a remover partículas de sujidade e devem ser misturadas com fibras de fardos diferentes com o objetivo de melhorar a consistência da fibra misturada. Esta classificação e limpeza são efetuadas em máquinas apropriadas. Esta máquina consiste num cilindro, constituído por uma espécie de “dentes” pontiagudos. Estes dentes puxam as fibras desequilibradas à parte, aveludando-as enquanto separam as impurezas. Como a alimentação da máquina surge de diversos fardos, esta vai ter fibras misturadas à medida que as limpa e abre.
- **Cardação** Os tufo de fibra da mistura e abertura, são transportados por um fluxo de ar e são alimentados a uma máquina de cardar, que transporta a fibra sobre um cinto equipado com agulhas de arames. A rotação faz com que as fibras se alinhem em folhas finas e paralelas. As fibras mais curtas, poderiam enfraquecer o fio e por isso são removidas. Outro objetivo desta etapa é alinhar melhor as fibras para as preparar para a fiação. Por último, a folha das fibras cardadas é removida através de um funil numa lasca.
- **Pentear:** Esta etapa é semelhante à anterior, com exceção de que neste caso, as escovas e as agulhas são mais finas e encontram-se mais juntas. Várias

lascas de cartão são alimentadas à máquina de pentear e removidas o mais finas e limpas possível.

- **Desenho:** Diversas lascas são combinadas e alimentadas a uma máquina conhecida como moldura de desenho. O desenho contém vários cilindros que rodam a velocidades sucessivamente mais elevadas. À medida que as lascas vão passando, vão sendo mais alongadas, até ao ponto de serem cinco ou seis vezes superiores à sua forma original. Nesta etapa, podem-se juntar diferentes tipos de fibras, tal como algodão e poliéster para se formar misturas.
- **Esboço:** Este processo oferece uma ligeira torção, uma vez que remove fios para um parafuso rotativo. Após esta etapa, as mechas, podem ser misturadas com outras fibras antes de ser processado em tecidos têxteis.
- **Fiação:** As mechas produzidas anteriormente, são montadas na estrutura de fiação. A fita, é primeiramente alimentada através de um conjunto de rolos de desenho, que a alongam e esticam ainda mais. É então alimentada num parafuso de alta velocidade. A diferença das velocidades determina a torção conferida à fita [15].

Fibras não naturais

As fibras têxteis não naturais dividem-se em dois grupos. O primeiro é o que se obtém a partir de polímeros naturais, ou seja, grandes moléculas que existem na natureza constituídas por moléculas mais simples, mas que se repetem muitas vezes, transformadas posteriormente por ação de diferentes reagentes químicos. A estas fibras também se pode dar o nome de fibras artificiais.

As fibras artificiais podem-se dividir em quatro tipos de acordo com a origem do polímero: nomeadamente de celulose regenerada, quando os polímeros que as constituem são de celulose sem qualquer tipo de modificação, de celulose modificada, quando os polímeros que as constituem são de celulose modificada, de natureza proteica, quando os polímeros que as constituem são obtidos a partir de substâncias proteicas naturais, e por último, de outras origens naturais, como por exemplo, de polímeros obtidos das algas marinhas ou da árvore de borracha [15].

Na Figura 3.5, encontra-se um esquema onde estão divididas as fibras não naturais e os polímeros e copolímeros correspondentes.

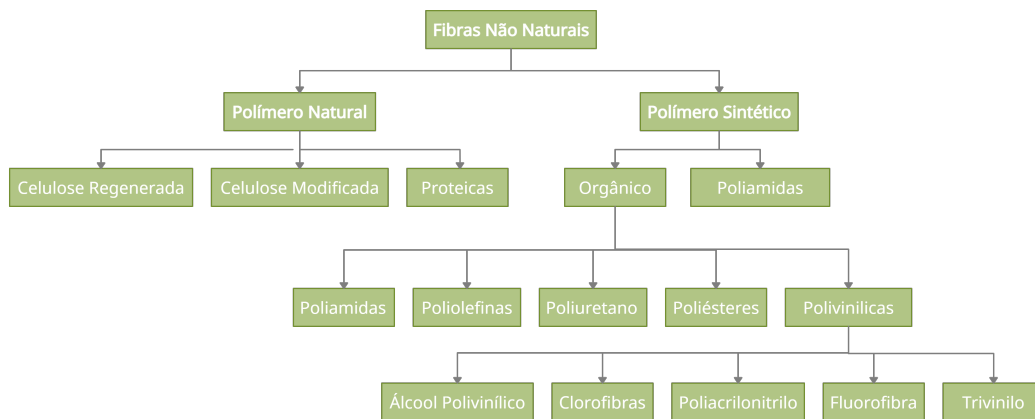


Figura 3.5: Diferentes tipos de fibras não-naturais [15].

Como referido anteriormente, as fibras têxteis não naturais são as fibras que são produzidas pelo Homem, na sua maioria obtidas por síntese química, ou seja, um agregado de pequenas moléculas, onde resultam macromoléculas de grande extensão, em que ocorre a repetição de um grande número de vezes da molécula mais simples. Este tipo de fibras pode ainda ser de origem orgânica ou inorgânica. As fibras de origem orgânica dividem-se em seis grandes famílias, designadamente, as poliamidas, os poliésteres, as polivinílicas, as poliolefinas, as poliuretanas e existe uma última família chamada de outros tipos [15].

Por outro lado, as fibras que são transformadas por ação do Homem através de reagentes químicos são as fibras artificiais, tal como o acetato.

Fibras sintéticas

O fabrico das fibras sintéticas tem como base os polímeros sintetizados pelo Homem. Estes polímeros têm como base produtos como o carvão e o petróleo, ou seja, combustíveis fósseis. Normalmente, os polímeros são obtidos com a forma de grãos e tem origem numa das seguintes reações de polimerização:

- **Poliadição:** O polímero é formado a partir do monómero, sem a eliminação das moléculas mais pequenas. Exemplos de polímeros obtidos a partir desta reação são o poli(acrilonitrilo), o poli (cloreto de vinilo), o polietileno e o polipropileno.
- **Policondensação:** O polímero resulta da reação entre duas moléculas e normalmente ocorre a libertação de uma molécula simples, tal como H_2O , HCl ou NH_3 . Os poliésteres e as poliamidas são exemplos de polímeros obtidos a partir deste tipo de reação.

O grau de polimerização influencia diretamente as diferentes propriedades do polímero, tal como a dureza, elasticidade e a flexibilidade [21].

Relativamente ao fabrico das fibras sintéticas, como por exemplo as celulósicas, estas são fabricadas por processos que são relativamente semelhantes ao fabrico da seda, que consiste em forçar um líquido através de uma abertura onde o líquido irá solidificar de modo a formar um filamento contínuo. Várias fibras sólidas e ocas podem ser produzidas através de diferentes métodos, sendo que os principais vão ser descritos de seguida [15].

- **Fiação húmida:** Neste método, o polímero utilizado para formar a fibra é dissolvido numa solução. A solução é forçada sob pressão através de uma abertura para um banho líquido em que o polímero é insolúvel. Visto que o solvente é dissipado no banho, forma-se a fibra. Este tipo de fiação produz rayon, acrílico e modacrílico.
- **Fiação a seco:** Este método, utiliza um solvente que evapora no ar. O polímero dissolvido é extrudido para uma câmara de ar aquecido ou gás e de seguida o solvente vai evaporar, ocorrendo a formação da fibra. Normalmente pode ocorrer a recuperação do solvente para posterior utilização. A fiação a seco, produz fibras de acetato, triacetato e aramida.
- **Fiação por fusão:** Fibras poliméricas são fiadas através da fusão do polímero até ao estado líquido. O líquido é forçado através da abertura da máquina de fiar sob pressão e é refrigerado por um jato de ar de modo a formar o filamento. O nylon, por exemplo, pode ser fiado através deste método, numa extrusora, que é uma máquina composta por um cilindro longo aquecido que contém um parafuso rotativo. A matéria prima, vai sendo derretida à medida que percorre o parafuso aquecido, tornando-se um líquido, sendo de seguida extrudido para uma corrente de ar frio. Este método não requer reações químicas nem sistemas de recuperação de solventes. Outros tipos de fibras que podem ser fabricadas utilizando este método são o poliéster, olefinas e o vidro.

Após a fiação, as fibras sintéticas são alinhadas, ocorre a orientação das moléculas do polímero e faz-se o reforço do filamento. Os filamentos podem então ser texturizados de modo a obterem propriedades de fiação. A texturização utiliza aparelhos de enrolar, cravar e emaranhar para dar às fibras filamentos retos, para que se obtenha uma aparência e estrutura semelhante à das fibras naturais [15].

3.2.2 Poliéster

A fibra de poliéster é apresentada como sendo uma fibra formada por macromoléculas lineares em que a cadeia contém, pelo menos 85% em massa, de um éster, diol e do ácido teraftálico.

O poliéster, é uma fibra têxtil de grande importância a nível comercial, sendo um polímero formado por policondensação do ácido teraftálico com o diol etileno glicol. Na Figura 3.6, encontra-se apresentado a estrutura química do poliéster [22].

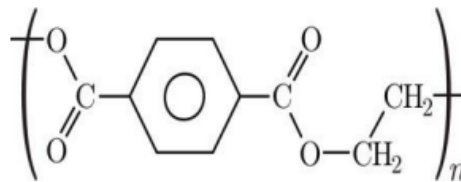


Figura 3.6: Estrutura química do poliéster [22].

Estas fibras são muito flexíveis, apresentam uma elevada resistência ao enrugamento, elevada durabilidade e estabilidade dimensional e são também resistentes ao ataque químico e ambiental. Nas fibras de poliéster verifica-se uma boa resistência aos ácidos inorgânicos em concentrações diluídas e a ação destes na respetiva fibra depende da concentração, temperatura e tempo de atuação [22].

Apresenta também uma boa resistência às bases, principalmente nas que se usam no processo de lavagem. Assim, as bases fortes atacam a superfície da fibra e as fracas penetram o interior desta, modificando assim as propriedades físicas. Apresenta ainda uma elevada estabilidade e elasticidade de forma e dimensão, é resistente à rutura e ao desgaste, tem uma condutividade térmica moderada e apresenta também propriedades anti-ruga. Tem ainda uma boa resistência à luz, fraco poder isolante e derrete e encolhe com o calor, dando origem a gotas que aderem à superfície em contacto [22].

De forma mais concisa, as principais propriedades do poliéster são:

- Bom isolamento térmico;
- Ótima resistência mecânica;
- Fácil cuidado;
- Boa estabilidade dimensional;
- Desenvolve eletricidade estática;

- Secagem rápida [23].

Contudo, o poliéster apresenta também desvantagens, tais como a sua hidrofobicidade, o que faz variar a sua capacidade de retenção de água entre 2 a 5%. Normalmente, estas fibras são das mais hidrofóbicas, e por isso a sua recuperação de humidade é menor que 0,5% para as condições de humidade relativa do ar normais, em torno de 65%, resultando assim num mau desempenho em relação à gestão da humidade [24].

Outra desvantagem bastante relevante é o facto de a sua matéria-prima ser o petróleo, uma fonte de energia não renovável, sendo a sua extração bastante poluente. Como o poliéster não é considerado um material biodegradável, leva demasiado tempo para se decompor. Outra desvantagem corresponde aos tecidos e produtos que misturam poliéster com outros materiais, dificultando o processo de reciclagem uma vez que fazer a separação dos componentes é um processo bastante complexo, tornado por vezes, impossível a reciclagem do produto. Artigos que apresentem poliéster na sua composição, libertam, quer na lavagem quer na própria decomposição, microplásticos. Estas partículas de plástico apresentam características de absorção de partículas pesticidas, metais pesados e os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs).

Assim, de modo a contornar estas desvantagens pretende-se estudar os biopolímeros, neste caso o PLA, devido à sua acessibilidade, biodegradabilidade, ser de fontes renováveis, como o milho, e ao facto de atualmente ser uma tendência no mercado [25].

O poliéster é utilizado em várias aplicações têxteis, nomeadamente no vestuário (muito usado em t-shirts *running*), têxteis-lar e também em aplicações industriais.

Poliéster biodegradável

Atualmente, os polímeros biodegradáveis apresentam uma ampla gama de propriedades que lhes permitem competir com os polímeros tradicionais em várias áreas tais como embalagens, têxteis, biomédicas, entre outras. A família dos biopolímeros mais investigada é representada por poliésteres, principalmente pelos alifáticos lineares que, dependendo das reações de síntese, podem ser classificados em dois grandes grupos:

- Poliésteres sintetizados a partir de reações de autopolicondensação de hidroxácidos e/ou ésteres ou por polimerização por abertura de cadeia cíclica ou anéis;

- Poliésteres obtidos a partir da policondensação, reações entre ácidos dicarboxílicos e glicóis [26].

Segundo a Antex, marca de fibras de poliéster biodegradável, a biodegradação é um processo em que a estrutura dos materiais é decomposta através do metabolismo ou processos enzimáticos. O processo de decomposição ocorre através de enzimas segregadas por microrganismos, presentes em ambientes anaeróbico, sem oxigênio, e aeróbico, na presença de oxigênio, desempenhando um papel muito importante no nosso ecossistema, e não apenas na biodegradação.

Dois produtos gerados no processo de biodegradação são a biomassa e o biogás (dióxido de carbono e metano). Apesar da biodegradação inicial na natureza ser aeróbica, as principais bioreações em aterros são anaeróbicas. Em aterros sanitários, os micróbios decompõem a matéria orgânica e reduzem o seu volume ou massa.

Os fios utilizados neste método são os fios de Yarnaway, que são modificados por uma mistura de compostos orgânicos que não interferem com as propriedades do produto final, quer sejam fios texturizados ou tingidos com solução. Isto é, a duração de vida e o desempenho durante a utilização permanece inalterado em comparação com qualquer fio de poliéster [27].

Para determinar a biodegradação anaeróbica, em condições de elevado teor de sólidos utilizam-se o teste ASTM D5511, que é um método equivalente ao da ISO DIS15985. Este método determina o grau de biodegradação dos materiais plásticos e é representativa das condições da atividade biológica em aterros sanitários.

Os fios Antex Yarnaway foram analisados através do método de análise ASTM D5511 e demonstraram que estes são anaerobicamente biodegradáveis. Durante os 106 dias de avaliação do teste padrão, existiu uma biodegradabilidade de aproximadamente 20% das amostras dos fios texturizados, enquanto o teste do poliéster permaneceu inalterado [27].

O poliéster demora cerca de 300 anos a decompor-se no meio ambiente. Por outro lado, as fibras de poliéster biodegradável conseguem reduzir bastante o período de decomposição para um intervalo de tempo de 3 a 5 anos.

Na Figura 3.7 encontra-se um gráfico resultante do ensaio ASTM D5511, ao longo dos 106 dias para avaliar a biodegradabilidade do poliéster standard e do poliéster biodegradável, tanto tingidos como cru. Tal como se pode observar do gráfico, o poliéster dos fios de Yarnaway apresentam uma percentagem de biodegradabilidade muito mais elevada do que os poliésteres standard [27].

Biodegradation

Approx. 20% biodegradation after 106 days (ASTM D 5511-18)

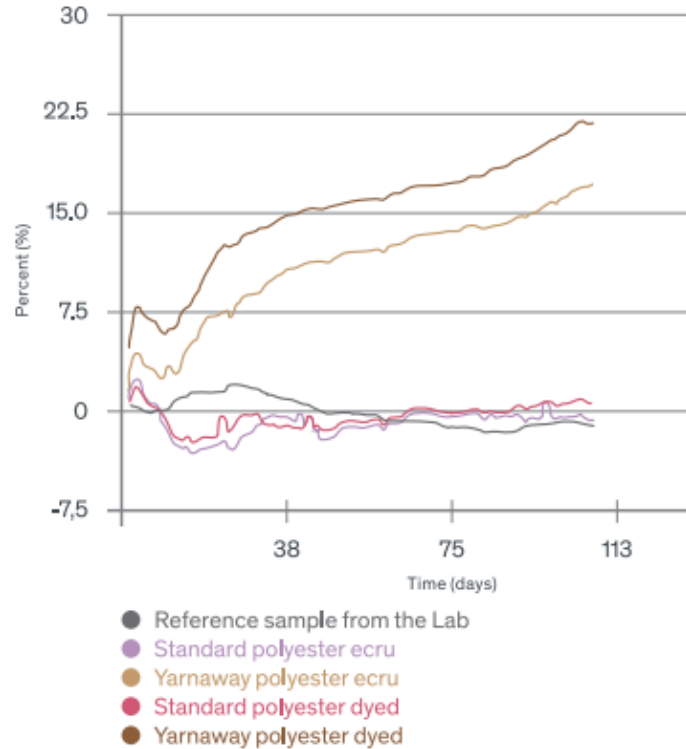


Figura 3.7: Biodegradação Poliéster standard e Poliéster Yarnaway [27].

A biodegradação é uma das opções para combater a grande quantidade de resíduos plásticos que acabam em aterros sanitários. Apoiado por testes laboratoriais e provas científicas, os fios Yarnaway oferecem uma solução para a contaminação dos aterros, aumentando a biodegradação em aterros biologicamente ativos.

Estes fios podem ser reciclados em materiais têxteis novos ou plásticos. É importante optar por formas de reciclagem de resíduos. Contudo ainda há muito a ser desenvolvido nesta área e no design de produtos têxteis. Este tipo de fios podem ajudar a reduzir o impacto da indústria e produtos têxteis sobre o ambiente [27].

3.2.3 Biopolímeros

Os biopolímeros são polímeros ou copolímeros produzidos a partir de matérias-primas de fontes renováveis tais como o milho, cana de açúcar, celulose, quitina entre outras. São conhecidos como fontes renováveis uma vez que apresentam um ciclo de vida mais curto quando comparado com fontes fósseis como é o caso do petróleo.

Devido ao elevado aumento da produção de plástico que tem existindo ao longo dos anos, procura-se solucionar os problemas causados pela acumulação de materiais com origem na área da petroquímica [28].

Os biopolímeros apresentam um crescente interesse atualmente devido aos grandes impactos ambientais causados pelos processos de extração utilizados para a produção de polímeros convencionais, que tem origem no petróleo, por exemplo. O facto dos polímeros não serem biodegradáveis na sua maioria, contribui para o aumento de acumulação de plásticos sem destino apropriado o que leva a um longo espaço de tempo para que seja novamente assimilado pela natureza. Contudo, os biopolímeros apresentam algumas limitações técnicas que dificultam o seu processo e o seu uso como produto final. Assim, existe a opção, que tem sido bastante estudada, da modificação dos biopolímeros de modo a viabilizar o seu processamento e o uso do mesmo em diversas aplicações.

Para isso são feitas misturas mecânicas de dois ou mais polímeros, sem que ocorra ligações químicas entre eles, com o objetivo de melhorar propriedades como resistência térmica, mecânicas, reológicas e permeabilidade a gases [28].

Nesta dissertação o biopolímero trabalhado foi o PLA, que é produzido por síntese química a partir de ácido láctico obtido por fermentação bacteriana de glicose extraído do milho.

Poliácido láctico (PLA)

O PLA é um material termoplástico, linear, alifático, semicristalino ou amorfo e biodegradável, sintetizado a partir do ácido láctico obtido de fontes renováveis, com propriedades mecânicas semelhantes ao poliestireno (PS) e ao politereftalato de etileno (PET). Este biopolímero é bastante utilizado em filmes flexíveis, garrafas, produtos moldados por injeção, embalagens rígidas, entre outros. Na Figura 3.8, encontra-se a estrutura química do PLA [29].

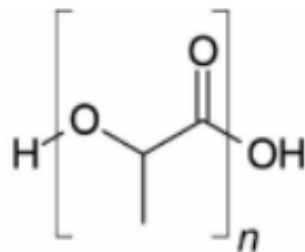


Figura 3.8: Estrutura química do PLA [29].

As propriedades mecânicas do PLA comercial podem variar desde materiais macios e elásticos até materiais rígidos e de alta resistência, tendo em conta diferentes parâmetros, tal como a cristalinidade, estrutura polimérica, peso molecular, entre outros.

- **Síntese**

O fabrico de PLA requer a produção de dois produtos intermédios, o ácido láctico e açúcares. O ácido láctico é gerado através da fermentação de açúcares obtidos do processamento de vários tipos de biomassa. O uso de amidos e açúcares é mais favorável comercialmente, enquanto o uso de materiais lignocelulósicos apresenta-se como o menos avançado [30].

A estrutura e a composição das cadeias de PLA influenciam diretamente o seu processamento, cristalização e degradação. O polímero apresenta uma isomeria ótica e a estrutura estereoquímica pode ser alterada pela copolimerização de misturas de L-lactídeo, meso-lactídeo e D-lactídeo, dando origem a três formas enantioméricas: poli(L-lactídeo) (PLLA), poli(D-lactídeo) (PDLA) ou poli(D,L-lactídeo) (PDLA), tal como se encontra na Figura 3.9.

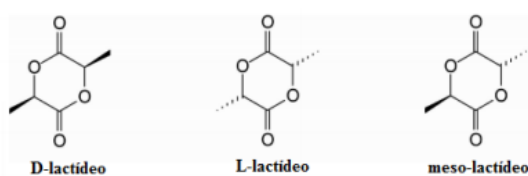


Figura 3.9: Os três estereoisómeros do lactídeo [29].

O L-lactídeo, homopolímero isotático de PLLA, é um material semicristalino que apresenta o maior ponto de fusão. Os copolímeros do PLA com alta concentração de isômero D- têm baixo ponto de fusão e a sua cristalização ocorre lentamente. Estes polímeros tornam-se amorfos em concentrações de D- acima de 12 a 15% [29].

A síntese pode dar-se através dos processos de polimerização por policondensação direta e polimerização por abertura de anel [29].

A polimerização do ácido láctico por condensação usa, normalmente, uma solução aquosa do monómero, podendo utilizar ou não um catalisador e altas temperaturas. O polímero resultante apresenta, normalmente, um baixo peso molecular,

parecendo um material bastante quebradiço, com ausência de propriedades mecânicas para grande parte das aplicações. Por outro lado, a polimerização por abertura do anel, utiliza o dímero cíclico do ácido láctico, lactídeo, para a obtenção de poli(lactídeo) de elevado peso molecular.

Polimerização por abertura de anel:

- A polimerização por abertura de anel, é uma polimerização em cadeia que utiliza monômeros cíclicos para a obtenção de macromoléculas. A síntese do PLA através desta metodologia é realizada utilizando o monômero cíclico. Este monômero é obtido através da despolimerização do poli(ácido láctico) de baixo peso molecular a pressão reduzida, dando origem a uma mistura de isômeros D-, L-, e DL-. Esta metodologia, apesar de ser a mais utilizada atualmente para a produção de PLA, a polimerização por abertura de anel do lactídeo apresenta um elevado custo para o produto final, devido às diversas etapas necessárias para a obtenção e purificação do monômero cíclico. Posto isto, a procura por alternativas que diminuem o custo final para este polímero apresenta elevado interesse para a indústria [31].

Polimerização por policondensação:

- A polimerização por policondensação caracteriza-se pelo lento aumento do peso molecular do polímero, existindo um único mecanismo de reação para a sua formação. Neste caso, o monômero bifuncional misto, como é o caso do ácido láctico, ou uma quantidade equimolar de dois monômeros bifuncionais diferentes (por exemplo, um diol e um diácido) são necessários para a formação de um polímero linear. A reação de polimerização resulta da reação individual dos grupos funcionais presentes nos monômeros com a consequente libertação de uma molécula menor, normalmente água, resultante da condensação deste dois monômeros [32].

Ao contrário do que se verifica nas reações em cadeia, onde a quantidade de iniciador utilizada corresponde ao número de cadeias propagantes do polímero na reação, não existe um controlo sobre o crescimento das cadeias na polimerização em etapa [32].

• Processabilidade

O PLA é um material de alta transparência e taxa de cristalização relativamente baixa, apresentando assim diversas possibilidades de processamento, podendo ser

utilizado para o fabrico de filmes orientados biaxialmente, embalagens termoformadas e garrafas moldadas por injeção por sopra.

Os filmes realizados com PLA apresentam altas taxas de transmissão de humidade e taxas de transmissão de oxigénio e CO_2 muito baixas. Para além disto têm também boa resistência química a hidrocarbonetos óleos vegetais, entre outros.

De modo a melhorar a processabilidade do PLA e propriedades tais como flexibilidade, resistência ao rasgo e resistência ao impacto, adiciona-se, normalmente, agentes plastificantes [33].

• Principais propriedades

O PLA, é considerado um plástico rígido, por ser semicristalino, estando o seu módulo de elasticidade entre 3000 e 4000 MPa. Apresenta também uma temperatura de transição vítrea (T_g) entre 50 a 80 °C e temperatura de fusão (T_m) entre 130 a 180 °C [27]. Outras propriedades como a percentagem de alongamento à ruptura ou o máximo de força suportada antes da rutura são também significativamente afetadas pela percentagem de cada enantiómero na cadeia de PLA [34].

Quanto à solubilidade, o PLA amorfo é solúvel na maior parte dos solventes orgânicos, tais como o tetrahidrofurano (THF), solventes clorados, benzeno, acetonitrilo, clorofórmio, e dioxano, enquanto o PLA semi-cristalino é solúvel em solventes clorados e benzeno a elevadas temperaturas [34].

O interesse na produção fermentativa de ácido láctico tende a aumentar, devido ao seu potencial de utilização como sendo um recurso renovável e substituto de petroquímicos. No processo de fermentação, os custos dos substratos são reduzidos, uma vez que a energia utilizada é baixa e a temperatura é também reduzida, tornando assim este processo de produção viável [35].

Assim, as principais vantagens do PLA são:

- Fabricado com matérias-primas 100% renováveis;
- É emitido até menos 70% de CO_2 e é consumida até menos 42% de energia durante o processo de produção de matéria-prima;
- Reciclável e 100% biodegradável (industrialmente compostável);
- Boa estabilidade UV;
- Boa solidez à luz;
- Boas propriedades de absorção (importante em roupas funcionais);

- Maior elasticidade do que PET;
- Baixa temperatura de tingimento, de 110 °C, o que significa uma poupança de energia durante o processo de tingimento;
- Certificação ISEGA para tipos de fibra PLA selecionados usados em aplicações de filtração de água quente (filtros de chá e café) e para materiais de embalagens que entram em contacto com alimentos [36].

Por outro lado, o PLA apresenta também desvantagens. O PLA apresenta maior sensibilidade ao alcali e provoca perda de força. Apresenta uma coesão superficial, que fornece às fibras uma propriedade conhecida como "*scroop*" o que influencia a resiliência e provoca problemas nas aplicações ao resistir à recuperação após deformação [37]. Assim, apresenta baixa deformação até ao ponto de rotura e por isso, em níveis de elevada exigência mecânica, a utilização do PLA torna-se limitada [37].

De modo a contornar estas limitações, pode-se recorrer às misturas físicas utilizando polímeros que possuam propriedades mecânicas diferentes, de modo a melhorar ou complementar as características do PLA. Para realizar estas misturas destacam-se o Poli(óxido etileno) (POE), Poli (butileno adipatoco-tereftalato) (PBAT), Polihidroxibutirato (PHB), Poli(- caprolactona) (PCL), Polibutileno succinato (PBS), entre outros [38].

Estas misturas de polímeros garantem um meio rápido e económico para alterar ou melhorar as propriedades de um polímero, excluindo o elevado custo e o esforço envolvido na pesquisa e desenvolvimento de novos polímeros. Contudo, esta mistura deve ser realizada com outros plásticos também eles biodegradáveis para que o composto final apresente essa característica [39].

- **Aspetos ambientais**

Após a produção, processamento e utilização do PLA, este vai ser descartado, sendo necessário ser enviado para um destino final. Este biopolímero é considerado biodegradável sob condições de compostagem industrial, contudo não se degrada nas condições de compostagem doméstica. Isto acontece uma vez que na compostagem industrial consegue-se atingir temperaturas mais altas e a biomassa é misturada com mais frequência do que na doméstica, tornado o sistema mais homogêneo, provocando assim uma maior degradação da biomassa.

Na degradação, o PLA sofre hidrólise e pode-se transformar em oligómeros, dímeros e monómeros num intervalo de tempo de 45 a 50 dias a uma faixa de

temperaturas de 50 a 60 °C. O biopolímero necessita destas condições para que se degrade. Se for apenas enterrado no solo, a sua degradação vai ser muito lenta [[40].

O carbono presente no PLA tem origem biogénica e foi fixado na atmosfera durante o crescimento da planta. Assim, enquanto o carbono estiver na estrutura do PLA, vai-se encontrar inerte. O processo de biodegradação do PLA irá devolver este carbono na forma de CO_2 para a atmosfera. Por outro lado, os polímeros com origem fóssil, apresentam na sua composição carbono que não foi fixado na atmosfera.

Assim, fazendo uma comparação entre os polímeros de origem renovável e os de origem fóssil, os polímeros petroquímicos contribuem com a emissão de carbono fóssil, também na forma de CO_2 [41].

Os tecidos obtidos com o PLA podem ser finos e brilhantes como a seda ou espessos e aconchegantes [41].

- **Mercado**

O produto foi patenteado pela DuPont na década de 1950, mas devido a certos problemas, a empresa teve que descontinuar as suas pesquisas. O desenvolvimento em escala industrial só teve início em 1997, com a parceria Cargill-Dow, até à saída desta última resultando na empresa Nature Works-Cargill. Atualmente, a Nature Works LLC USA, é um dos mais importantes fornecedores de fibras de PLA sob diversas marcas, tais como a marca Ingeo, Lactron, Ecodear, Terramac, Plastarch, entre outras [26]. Outras empresas envolvidas na produção de PLA são as japonesas Mitsui Toatsu e Toyota/ Shimazu, em fase de planta piloto, a holandesa Hycail, incorporada pela Tate Lyle em 2006, também esta em fase piloto, belga Galactic, a alemã Inveta- Fisher, a italiana Snamprogetti e diversos produtos chineses [28].

Polibutileno Succinato (PBS)

O PBS é um poliéster alifático biodegradável sintético produzido a partir do 1,4-butanodiol com o ácido succínico (AS). Para além do butanodiol, o monômero AS também tem perspectivas de ser produzido de matéria-prima renovável com diversas pesquisas orientadas para a produção tendo por base carboidratos, por via fermentativa [42].

- **Síntese**

Este polímero pode ser obtido a partir de derivados fósseis ou de matérias-primas renováveis como sacarose, glicose, maltose e frutose. Estes, quando submetidos ao processo de fermentação por algumas espécies de bactéria, dão origem

ao ácido succínico e 1,4- butanodiol que são os precursores para a síntese química do PBS [42]. Na Figura 3.10 encontra-se um esquema das diferentes formas de obtenção do PBS.

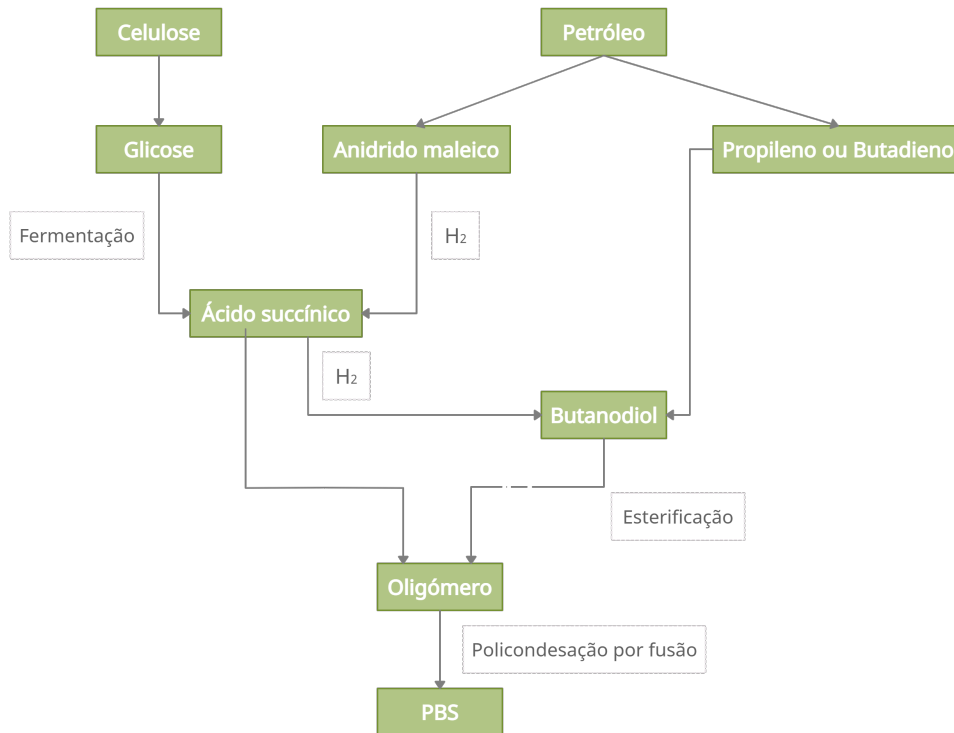


Figura 3.10: Fluxograma da obtenção do PBS [43].

A síntese do PBS ocorre em duas etapas principais, sendo a primeira a de esterificação dos precursores ácido succínico e 1,4- butanodiol, onde a reação produz água como subproduto. De modo que a água seja removida do sistema com sucesso para produzir uma boa conversão e um polímero de elevada massa molecular, deve ser aplicado vácuo ou nitrogénio seco ao sistema reacional. A segunda etapa é a de policondensação dos oligómeros formados sob altas temperaturas para aumentar a velocidade de reação. O catalisador mais utilizado na síntese de PBS é o tetrabutóxido de titânio [42].

O processo metabólico do qual devem ser extraídos os intermediários dos poliésteres alifáticos é o Ciclo de Krebs que no seu percurso normal é capaz de oxidar os seus intermediários, neste caso o acetato em acetil-CoA, dando origem a produtos como gás carbónico e água [43].

• Processabilidade

Como é habitual nos polímeros, a processabilidade depende diretamente da sua estabilidade térmica, que neste caso é sensível à quantidade de água presente, à

presença de ácidos carboxílicos residuais e à estrutura molecular das suas cadeias. Assim, PBS com massa molar menor do que 100 000 g/mol podem ser utilizados em extrusão e injeção, enquanto que os que apresentam uma massa molar maior são processados através de moldagem e extrusão a sopro.

Apresenta uma excelente capacidade de ser processado e boas propriedades mecânicas. Possui estabilidade térmica até 200°C, ou seja, boa resistência térmica e resistência química a solventes e outros produtos químicos [44].

- **Principais propriedades**

O PBS corresponde a um termoplástico semicristalino com aparência branca, opaca.

Corresponde a um biopolímero com uma temperatura de transição vítrea (T_g) que pode variar entre -45°C e -10°C. Apresenta uma temperatura de fusão (T_m) que pode variar entre 90°C e 120°C.

O PBS apresenta uma boa resistência à tração, na gama dos 46 MPa, rigidez e dureza moderada. A sua resistência à flexão corresponde a 37 MPa. Em termos mecânicos, pode ser considerado um polímero tipicamente resistente. Quando comparado com o PLA, o PBS pode ser caracterizado como um material duro e resistente [44].

Na Tabela 3.1 encontra-se uma comparação das fibras de PLA com as fibras de poliéster e PBS. As fibras de PBS apresentam um menor módulo de elasticidade e menor resistência à tração comparativamente às fibras de PLA e poliéster. Por outro lado, as fibras de PLA apresentam um menor alongamento à rutura em relação ao poliéster e PBS. Ao contrário de outras fibras sintéticas, o PLA não absorve luz na região do visível do espectro, o que leva a uma perda de resistência em comparação às fibras sintéticas na exposição à luz UV.

Tabela 3.1: Propriedades das fibras de PLA em comparação a outras fibras [26].

Propriedades	Fibra de PLA	Poliéster	PBS
Temperatura de fusão (°C)	130-180	260	115
T_g (°C)	55-60	70-80	-30
Módulo de elasticidade (MPa)	3700	1600-4100	500
Resistência à tração (MPa)	50	35- 95	35
Alongamento à rutura (%)	2.5	30-300	300

- **Aspetos ambientais**

Espera-se que a biodegradação de poliésteres alifáticos como o PBS, obtidos através de matérias-primas renováveis pela ação de microrganismos, origem subprodutos biocompatíveis e biodegradáveis com produção de resíduos não tóxicos, fazendo com que estes materiais tenham elevada importância nas áreas ambientais e biomédicas [43].

Este tipo de polímero pode ser degradado em condições moderadas de temperatura e pressão e a sua capacidade de biodegradação está diretamente relacionado à presença do grupo éster, tal como se encontra na Figura 3.11, sendo facilmente hidrolisado, levando à quebra das ligações. Assim, ocorre a despolimerização pela ação de enzimas do tipo esterase, provenientes de microrganismos encontrados no solo [43].

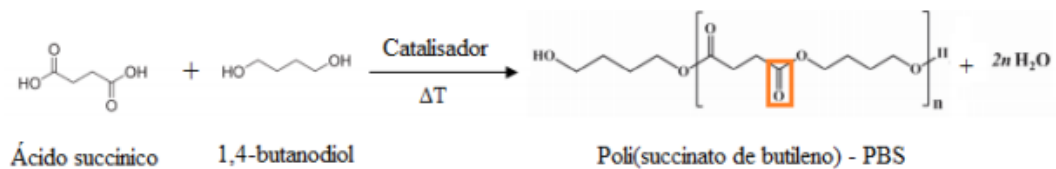


Figura 3.11: Esquema de síntese do PBS [45].

A degradação do PBS pode ocorrer por hidrólise não enzimática, sendo este um processo em que o rompimento de ligações é impulsionado apenas pela presença de água. Este também pode sofrer degradação por hidrólise enzimática, processo em que a reação de hidrólise é catalisada por enzimas. Estas duas formas de degradação consistem em métodos potenciais para a recuperação do monómero do PBS depois de ter sido utilizado, ou seja, constituem métodos de reciclagem química [46].

A hidrólise enzimática também pode ocorrer por meio de enzimas disponibilizadas por microrganismos, quando o polímero e os microrganismos coexistem num ambiente natural favorável para que a reação ocorra (solo húmido, água do mar, entre outros). Nesta situação, o PBS degrada-se por biodegradação. Estes tipos de degradação são diferentes, contudo envolvem mecanismos similares, sendo por isso, influenciados pelos mesmos fatores, em geral.

Uma diferença que é bastante relevante, é o facto de que na degradação por hidrólise, tanto enzimática como não enzimática, que não envolve microrganismos, há a libertação de monómeros para o meio, o que vai afetar diretamente o pH da solução, sendo por isso o controlo de pH um importante parâmetro para este processo [46].

É possível afirmar que o PBS pode sofrer biodegradação sob condições específicas. A redução das propriedades mecânicas e a percentagem de perda de peso do PBS quando enterrado no solo naturalmente é significativamente inferior à composição, devido ao aumento de temperatura e humidade existente na câmara [47].

As suas propriedades físicas e a possibilidade de diminuição do custo de produção pelo uso de matérias-primas renováveis para biossíntese dos monómeros BDO e AS, torna o PBS uma alternativa futura bastante forte na competição com o PLA.

- **Mercado**

O mercado do PBS tem crescido nos últimos anos, uma vez que apresenta ótimas propriedades mecânicas e térmicas sendo estas comparadas às do polietileno e do propileno, polímeros que são normalmente utilizados na indústria do plástico. Para além disto, as suas propriedades facilitam a sua processabilidade, uma vez que é possível a utilização de métodos convencionais de processamento tal como a extrusão e injeção. Deste modo, torna-se possível obter filamentos, fibras têxteis e também produtos injetados em molde, tornando as aplicações do PBS mais amplas.

A primeira empresa a produzir PBS com propriedades interessantes a nível comercial foi a Showa Denko, em 1993. Desde aí, esta empresa é uma das maiores produtoras de PBS. A empresa tem realizado grandes contribuições para uma sociedade cada vez mais sustentável, através do desenvolvimento do composto de PBS e amido [46].

3.3 Controlo de qualidade

Os ensaios de controlo de qualidade são fundamentais para a caracterização dos produtos e para fornecer indicações em relação à sua manutenção. Os ensaios podem também fornecer informações de modo a otimizar o processo de fabrico e possíveis aplicações desses produtos. As empresas ainda podem recorrer a estes ensaios para avaliar a qualidade de um produto, que tem como objetivo fazer despiste de problemas que surgem durante o uso.

De seguida, serão apresentados alguns ensaios que têm como objetivo garantir a qualidade dos produtos.

3.3.1 Avaliação da diferença de cor

O sistema utilizado para avaliar a diferença de cor é o Sistema CIElab. O sistema CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*), estabeleceu o diagrama cromático

Yxy, em 1931 e o espaço colorimétrico $L^*a^*b^*$ em 1976 permitindo desta forma a elaboração de um padrão no qual é possível comparar todas as cores [48].

As expressões que caracterizam este sistema são:

$$\Delta L^* = L^*_{ensaio} - L^*_{padro}$$

$$\Delta a^* = a^*_{ensaio} - a^*_{padro}$$

$$\Delta b^* = b^*_{ensaio} - b^*_{padro}$$

Sendo que a L^* corresponde ao grau de luminosidade, ou seja, varia entre branco a preto, a coordenada a^* é a identificação da tonalidade na direção do verde para o vermelho e a coordenada b^* diz respeito à tonalidade na direção do azul para o amarelo. Na Figura 3.12, encontra-se representado as coordenadas definidas, sendo que está representado como estas variam a nível de cor [48].

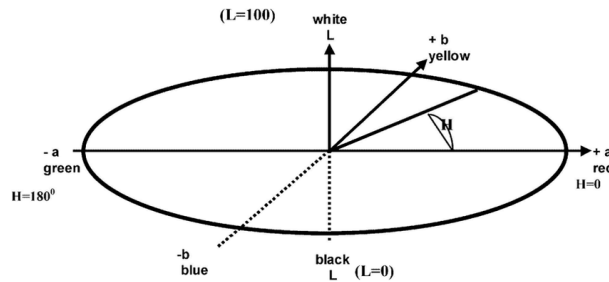


Figura 3.12: Coordenadas $L^*a^*b^*$ [48].

A diferença absoluta destas três coordenadas é dada por ΔE^* e apresenta a seguinte expressão:

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

Em condições controladas, um valor de ΔE maior ou igual a 1 pode ser detetado pelo olho humano. Se dois objetos estão lado a lado, num ambiente com condições controladas, a menor diferença de cor detetada pelo ser humanos é um valor de ΔE de 1 [48].

3.3.2 Avaliação da gramagem

A avaliação da gramagem baseia-se na massa por unidade de área, em gramas por m^2 de um artigo.

A gramagem varia muito de artigo para artigo, dependendo sempre do objetivo final da peça em questão. A gramagem de uma t-shirt pode variar entre 170 e 200 g/m^2 .

3.3.3 Avaliação do pH

O pH diz respeito ao potencial hidrogeniônico de uma solução. Este é determinado através da concentração de iões de hidrogénio (H^+) e é utilizado para medir o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma determinada amostra [49].

Na indústria têxtil é fundamental a análise do pH, uma vez que os tecidos estão em constante contacto com a pele do nosso corpo, sendo que este não pode ser demasiado ácido visto que pode causar certas irritações cutâneas. Posto isto, é necessário cumprir um determinado intervalo de valores de pH de modo a garantir o controlo de qualidade necessário, sendo que estes valores, quanto mais neutros forem, melhor [49].

Capítulo 4

Economia Circular e ACV

No presente capítulo serão desenvolvidos os temas de Economia Circular e Análise do Ciclo de Vida, tanto do PLA como do poliéster para uma melhor perspetiva da biodegradação destas duas matérias-primas.

4.1 Economia Circular

A Economia Circular consiste numa economia industrial orientada para a sustentabilidade. O grande objetivo desta economia é recuperar o valor de bens tangíveis através de um ciclo fechado de reutilização e restauração, que tanto pode aumentar o desempenho económico e ambiental como a reciclagem e a energia a recuperar, ou seja, permitir que os materiais continuem a circular durante mais tempo, em ciclos fechados e idealmente contínuos. Na Economia Circular, a ideia de desperdício poderia ser reduzida através de um novo planeamento de produtos, procedimentos de fabrico e cadeias de abastecimento de modo a manter os recursos a fluir continuamente num ciclo fechado [50].

Assim, considera-se que a Economia Circular é um modelo que defende a redução, reutilização, recuperação e reciclagem dos materiais e energia, integrando-os de novo no ciclo de produção. Deste modo, é garantida uma maior eficiência na utilização e gestão de recursos, e uma maior sustentabilidade.

As mudanças para este novo modelo requerem uma alteração importante, que se inicia logo no princípio do processo de produção. Para aumentar o ciclo de vida de um produto deve-se pensar em reutilizá-lo e repará-lo, ou seja, os produtos têm que ser projetados de modo a durar mais tempo do que ocorre atualmente, permitindo assim o seu reaproveitamento. Neste caso, os materiais só não voltam a integrar o ciclo de produção por desgaste, sendo então reciclados [51].

A Economia Circular procura gerir os fluxos de materiais gerados, que podem ser de duas naturezas, tal como esta apresentado na Figura 4.1. Podem ter origem biológica, que reentram na biosfera de uma forma segura e contribuem para o aumento do capital natural e técnicos, que são desenhados de forma a circularem em todo o processo sem nunca entrarem em contacto com a biosfera e sem perderem as suas qualidades inerentes.

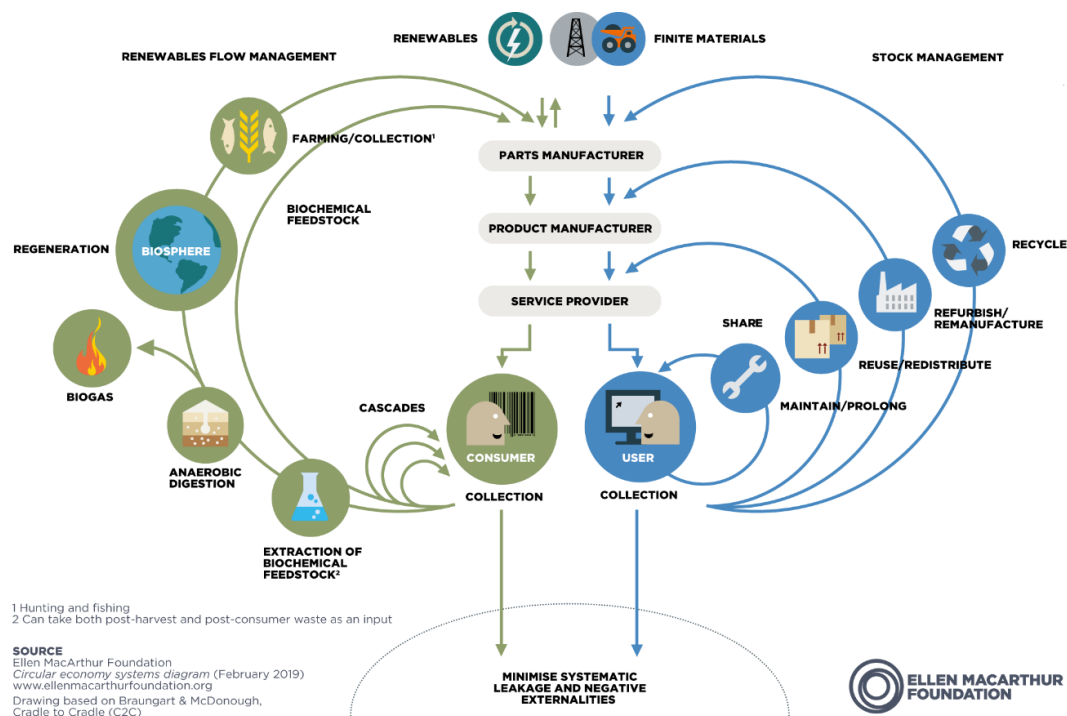


Figura 4.1: Diferentes naturezas dos fluxos de matérias gerados [50].

O conceito de Economia Circular traça uma distinção clara entre a definição de utilização e consumo de materiais, dado que procura transformar os fabricantes ou retalhistas em agentes que fornecem a utilização do produto e não o seu consumo. Ou seja, quem fornece o produto ou serviço irá reter a posse do bem em vez de a transferir para o consumidor, evitando, deste modo, o fluxo linear tradicional, apostando em produtos mais duráveis, sustentáveis e renováveis [52]. Fundamentalmente, a Economia Circular é baseada em 5 princípios:

- **Minimização de desperdícios:** Os desperdícios serão minimizados quando as componentes biológicas e técnicas são inerentemente desenhadas com o intuito de se inserirem nos respetivos ciclos;
- **Versatilidade:** A versatilidade, adaptabilidade e um design modular devem ser elementos prioritários aquando do desenho de um produto, dado que os tempos correntes são caracterizados por evoluções e alterações rápidas dos padrões de consumo e mentalidades dos consumidores;
- **Utilização de energias renováveis:** Os sistemas impregnados na Economia Circular devem ambicionar a utilização de energias renováveis durante todo o seu processo produtivo. Por energias renováveis inclui-se, também, o capital humano;
- **Reutilização de desperdício:** Tanto as componentes biológicas como as componentes técnicas produzem desperdícios que podem, e devem ser reaproveitados e reintroduzidos de volta nos seus respetivos ciclos, de modo a alimentar futuras produções; no que se refere às componentes biológicas, estas podem ser reintroduzidas de volta na biosfera através de ciclos não tóxicos e restaurativos. Nas componentes técnicas, devem ser implementadas melhorias na qualidade dos produtos, permitindo o que se chama de *upcycling* (processo de conversão de materiais utilizados em materiais capazes de voltarem a serem consumidos);
- **Pensamento “em sistemas”:** Forma de pensamento que enfatiza os fluxos e as conexões que existem ao longo do tempo no processo produtivo (e para além dele), apresentando, desta forma, uma capacidade de incorporar condições regenerativas que perdurem durante o processo; para evitar o foco em partes singulares do sistema, que induziam à tomada de decisões com vista à resposta a problemas de curto prazo em vez de médio/longo prazo [52].

Este novo paradigma irá permitir:

- Menor utilização de recursos naturais;
- Redução de emissões;
- Aumento da utilização de energias renováveis e recicláveis;
- Menor quantidade de matérias-primas desaproveitadas;

- Manutenção do valor dos produtos, componentes e dos materiais dentro do ciclo económico.

Resumidamente, o conceito de Economia Circular é atual e relevante no sentido em que, dadas as pressões por parte das alterações climáticas que se têm vindo a sentir com maior intensidade, e com base em evidências do período industrial do século XVIII, é necessário alterar os modelos económicos e sociais vigentes de momento (caracterizados por uma Economia Linear), de modo a mitigar os efeitos que a ação humana tem no meio ambiente. O conceito de Economia Circular representa uma alternativa substancial ao tradicional modelo de Economia Linear que continua a predominar nos dias de hoje [52].

4.2 Análise do Ciclo de Vida (ACV)

Uma das ferramentas mais utilizadas para analisar os impactos ambientais de um determinado produto desde a sua fase inicial de confeção até ao fim, é a avaliação do ciclo de vida (ACV). Este método é também utilizado para avaliar os impactos ambientais dos processos e serviços. A Organização Internacional de Normalização (ISO) dispõe de uma série de normas para ACV [17], tal como a Norma ISO 14040 que define quatro fases para realizar um estudo completo de ACV, como se verifica na Figura 4.2.

A ACV é um processo com quatro etapas, que correspondem à definição do objetivo e do âmbito, ao inventário do ciclo de vida, à avaliação do impacto do ciclo de vida e à interpretação do ciclo de vida, tal como esta representado na Figura 4.2.

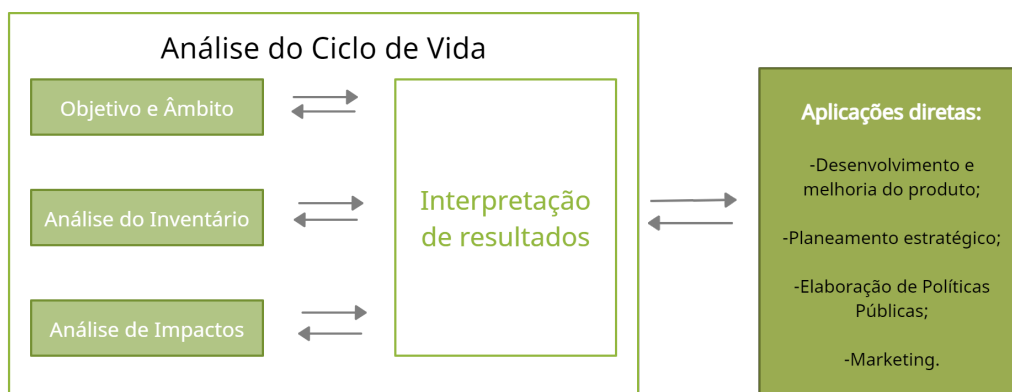


Figura 4.2: Análise do Ciclo de Vida [53].

- **Definição de Objetivos e Âmbito:** Define e descreve o produto, processo ou atividade. Estabelece o contexto no qual a avaliação é para ser realizada e identifica os limites e efeitos ambientais a serem revistos para a avaliação;
- **Análise do Inventário:** Identifica e quantifica a energia, água e materiais utilizados e descargas ambientais (por exemplo: emissões para o ar, deposição de resíduos sólidos, descargas de efluentes líquidos);
- **Análise do Impacto:** Analisa os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, água, e materiais e das descargas ambientais identificadas na análise de inventário;
- **Interpretação:** Avalia os resultados da análise de inventário e análise do impacto para selecionar o produto preferido, processo ou serviço com uma compreensão clara das incertezas e suposições utilizadas para gerar os resultados [53].

Atualmente esta ferramenta está a ganhar visibilidade e a sua aplicabilidade continua a aumentar em diversos setores industriais, tal como na indústria têxtil. Através da Avaliação do Ciclo de Vida é possível medir diversos indicadores do impacto ambiental tal como, a pegada ecológica, pegada de carbono, pegada hidráulica, toxicidade humana, entre outros [17].

A ACV é utilizada para muito mais do que apenas para a minimização do desperdício, sendo também utilizada para estimar as emissões de CO_2 e para analisar o fluxo de energia e água num processo. Como instrumento de avaliação ambiental que é responsável da utilização e emissão de varias matérias-primas em todas as fases da cadeia de produtos, a ACV está habituada a dar uma melhor avaliação do impacto ambiental, identificando a utilização total de energia, materiais utilizados e resíduos gerados a partir do momento em que as matérias-primas são obtidas para a eliminação final do produto.

Diferentes abordagens podem ser consideradas para se proceder a um estudo ACV. Esta análise pode ser:

- *Cradle to gate:* Relaciona-se com o processo de extração de matérias-primas e com as operações de produto e de serviço, excluindo todas as operações subsequentes, ou seja, antes de ser transportado para o consumidor [54].
- *Cradle to grave:* Relaciona-se com todas as etapas da avaliação do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas, até à etapa de fim de vida do produto [54].

- *Gate to gate*: Refere-se às etapas de produção que acontecem dentro de uma indústria ou local, que será geograficamente especificado. As operações que se encontram fora dos portões são excluídos [54].
- *Gate to grave*: Envolve todos os processos de distribuição, uso e disposição final do produto [53].

O método ACV tem sido aplicado a produtos têxteis e de vestuários, tal como camisas de algodão, t-shirts, jeans, entre outros. Esta avaliação considera o Ciclo de Vida completo de um produto, desde a sua extração inicial das matérias-primas até à eliminação de resíduos.

4.2.1 Análise do Ciclo de Vida do PLA

As diferentes fases da ACV e a sua interação umas com as outras estão representadas na Figura 4.2. Os investigadores normalmente seguem um de dois métodos diferentes de avaliação de ACV. O primeiro método é o *cradle to grave*. O segundo método é o *cradle to gate*. No primeiro método, é considerada toda a vida do produto e isso inclui as seguintes etapas:

- Cultivo do milho (preparação do terreno, fertilizantes, pesticidas, rega, colheita)
- Transporte;
- Fiação dos fios;
- Conversão do material de fios para tecido (tecelagem);
- Processamento químico (branqueamento, mercerização, tingimento, impressão e acabamento);
- Conversão do tecido em peça vestuário (modelação, corte, costura, prensagem);
- Inspeção, embalagem, transporte e distribuição;
- Utilização do produto pelo consumidor (lavar, secar, engomar e utilização)
- Eliminação do produto [17].

Cardle to cradle é um tipo específico de avaliação *cradle to grave*, onde a etapa de eliminação de fim de vida do produto é, por exemplo, um processo de reciclagem. É um método utilizado com o objetivo de minimizar o impacto ambiental dos produtos, aplicando práticas sustentáveis de produção, operação e eliminação e pretende integrar a responsabilidade social no desenvolvimento do produto.

A análise do fim de vida do PLA é importante para a determinação do seu potencial de acumulação. A grande parte dos filmes convencionais fabricados a partir do PLA são 100% biodegradáveis e compostáveis. Contudo, a sua biodegradabilidade depende de diversos fatores, tais como:

- Fatores associados à estrutura química, peso molecular e distribuição do peso molecular;
- Fatores associados à temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de fusão (T_m), cristalinidade, estrutura cristalina e módulo de elasticidade;
- Fatores relacionados às condições da superfície do material, como a área de superfície e propriedade hidrofílicas e hidrofóbicas [55].

Vários autores já analisaram os diferentes impactos ambientais causados pelas diversas formas de gestão de resíduos do PLA usando a ACV. As condições de reciclagem mecânica e reciclagem química do PLA foram estudadas e foi feita uma ACV comparando as duas diferentes formas de destino do biopolímero.

Tendo em conta o ponto de vista ambiental, a reciclagem mecânica aparenta ter melhores resultados do que a química, a nível de saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos. No entanto, o PLA produzido pela reciclagem mecânica apresenta uma qualidade inferior ao PLA produzido por reciclagem química [56].

Um estudo comparativo da ACV para avaliar, a nível ambiental, garrafas de PLA e PET, foi realizado. Concluiu-se que desde o princípio até à porta da fábrica, o PET apresentou maiores impactos na maioria das categorias, excluindo a eutrofização e potencial acidificação. Para a análise do fim de vida de garrafas de PLA, considerou-se vários cenários para a gestão de resíduos tais como o aterro, reciclagem, compostagem e inceneração. Segundo os resultados obtidos deste estudo, a inceneração contribuiu com a menor emissão de gases com efeito de estufa, seguida de reciclagem, compostagem e aterro, que apresentou o maior impacto ambiental. Para além disto, as projeções de fim de vida foram combinadas com o ciclo de vida completo, o que demonstrou que as garrafas de PLA apresentam um menor impacto ambiental do que as garrafas de PET, em relação às emissões de gases com efeito de estufa [57].

Na Figura 4.3 apresenta-se um fluxograma simplificado da produção, uso e destino final do PLA.

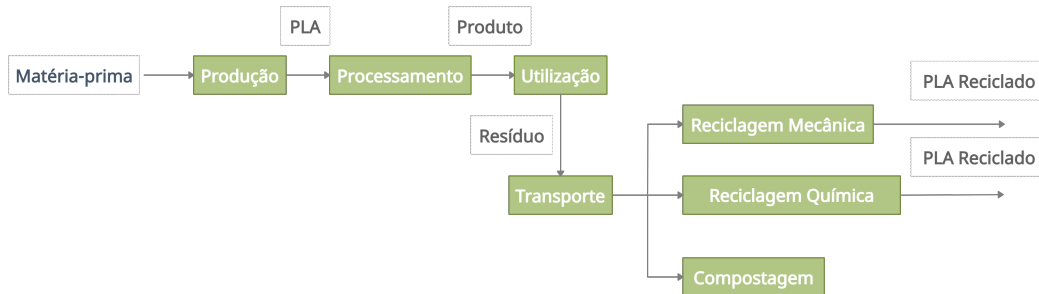


Figura 4.3: Análise do Ciclo de Vida do PLA [56].

Relativamente à etapa de produção do PLA, vai ocorrer a obtenção do ácido láctico pela fermentação do amido de milho e a polimerização do composto, que dá origem ao biopolímero PLA. De seguida, ocorre um processo de moldagem do material polimérico, dando assim origem a um produto final. Depois de ser utilizado e descartado, o produto torna-se um resíduo, que deve ser transportado até ao seu destino final ou reciclado [57].

Alternativas de fim de vida

Os bioplásticos podem ser reciclados de forma mecânica ou química, colocados em aterros ou em meio aquático e podem sofrer compostagem. Na verdade, podem sofrer os mesmos processos que os resíduos plásticos de origem fóssil. Contudo, estas opções dependem do polímero em questão, da aplicação e das condições do mesmo.

A degradação do PLA não depende apenas das características da morfologia deste, mas também das condições do ambiente circundante, incluindo a presença de água, humidade, temperatura, condições de acidez, presença de oxigénio e também a atividade dos microrganismos. Outros fatores que influenciam a degradação do PLA são a reatividade do polímero com a água e catalisadores e exposição à radiação UV [58].

Todos estes fatores variam de ambiente para ambiente. Por exemplo, a temperatura pode variar de 658°C, em locais de compostagem industrial, a temperaturas negativas em alto mar [57].

- **Reciclagem mecânica:**

A reciclagem, tal como referido anteriormente, pode ser mecânica ou química. O processo de reciclagem mecânica do PLA, inclui as etapas de separação, moagem, lavagem, secagem, extrusão, arrefecimento, granulação e peneiração do PLA [59]. É importante salientar que a etapa de separação do PLA residual ocorre manualmente, e por isso não há consumo de energia elétrica.

Assim, neste tipo de reciclagem, a composição química do material mantém-se inalterada, podendo ser reutilizado sem nenhum tipo de perdas. O material reciclado é transformado em grânulos, podendo ser aplicado numa vasta gama de novos produtos tendo em conta a sua pureza e qualidade [59].

- **Reciclagem química:**

A reciclagem química consiste em transformar polímeros nos seus monómeros ou em monómeros com menor peso molecular.

A reciclagem química é realizada através da hidrólise do PLA, que produz ácido láctico, seguidamente da polimerização do monómero, que forma novamente PLA. Assim, a reciclagem química é dividida em duas etapas: hidrólise e polimerização [60].

A hidrólise consiste na separação, moagem e lavagem do PLA residual, sendo inserido num reator juntamente com água. Quando a reação termina, o produto é arrefecido e obtém-se o ácido láctico com impurezas. De seguida, ocorre uma decantação e filtração de modo a remover estas impurezas. Para concentrar o ácido láctico, realiza-se uma evaporação da água. Durante a etapa de concentração, podem-se formar ésteres devido à presença de ácido láctico com concentrações elevadas. Para além de ácido láctico concentrado, a reação de esterificação precisa de elevadas temperaturas para ocorrer. De modo a minimizar a formação destes ésteres na evaporação, deve-se então utilizar a menor temperatura possível para facilitar a separação [60].

O processo de polimerização consiste em três etapas distintas, a formação do pré-polímero, a formação de lactídeo e, por fim, a abertura do anel, em que tem de ocorrer a remoção da água.

- **Compostagem:**

A compostagem é um processo nos quais os microrganismos são responsáveis pela degradação da matéria orgânica. Quando uma compostagem dos resíduos biológicos é eficiente pode-se impedir emissões de gases de efeito de estufa resultantes da decomposição e fornece um aditivo natural ao solo que trabalha como uma fonte

de carbono e de nutrientes. Os produtos da compostagem, para além de melhorarem a estrutura do solo, também substituem a necessidade de alguns fertilizantes de base química. Contudo, é importante referir que nem todos os bioplásticos biodegradáveis são compostáveis [61].

Existem dois tipos de compostagem:

- **Aeróbia:** As bactérias que atuam durante a compostagem aeróbia necessitam de oxigénio. Por este motivo, este processo ocorre em locais mais arejados. Este tipo de compostagem consiste na fermentação da massa de resíduos na presença de oxigénio.
- **Anaeróbia:** A compostagem anaeróbia corresponde a um processo de degradação biológica de resíduos orgânicos sem presença de oxigénio, que fornece a possibilidade de aproveitamento energético. Este aproveitamento pode ocorrer uma vez que no processo de fermentação ocorre a libertação de biogás, que pode ser utilizado como combustível [61].

Neste caso, todos os resíduos são moídos, incluindo o PLA, e são colocados em pilhas com matéria orgânica a ser degradada para a formação de um composto orgânico. Os resíduos são degradados em emissões, CO_2 , e o composto orgânico, que pode ser utilizado como adubo e é considerado um produto desse processo [61].

- **Aterro Sanitário:**

Um aterro sanitário corresponde a uma infraestrutura de deposição de resíduos com medidas de minimização ambiental.

Este tipo de infraestruturas incluem a drenagem e tratamento de águas lixiviantes e drenagem do biogás resultantes da fermentação anaeróbia dos resíduos depositados. O controlo das águas lixiviantes nos aterros sanitários é importante para não haver contaminação dos aquíferos e dos solos [62].

No caso dos bioplásticos, corresponde à pior solução, uma vez que existe uma deposição indiferenciada, não existindo nenhum tipo de valorização em aplicações mais úteis [58]. Os aterros sanitários representam uma grande evolução em comparação às lixeiras em termos de impactos ambientais.

Os aterros permitem que o metano originado nos aglomerados de lixo seja canalizado de uma forma controlada em vez de escapar para a atmosfera, como acontece nas lixeiras a céu aberto [62].

Assim, do ponto de vista ambiental, a reciclagem (mecânica ou química) apresenta ser uma alternativa de destino final relativamente favorável, uma vez que gera

um polímero que pode ser reaproveitado como um produto. Porém, existem situações em que não é possível realizar as reciclagens, e para estas situações a biodegradação por compostagem é a melhor forma de destino final do PLA, devido à completa degradação do polímero e conseqüentemente o desaparecimento do resíduo [61].

- **Meio aquático:**

Embora existam diversos estudos relativos à biodegradação do PLA no solo, existem poucos em meio aquático. Segundo um estudo, que consistiu em colocar garrafas de diferentes plásticos em meio aquático para avaliar a sua biodegradação ao longo do tempo, não se verificou perda de peso nas garrafas de PLA ao fim de 45 dias. Para além disto, durante um teste de degradação simultânea de uma garrafa de PLA e outra de PHBV (poli(hidroxi-butirato-covalerato)), a garrafa de PLA não apresentou qualquer tipo de desintegração após um ano a 25°C, enquanto a garrafa de PHBV foi parcialmente desintegrada [63].

Tendo em conta este estudo, é possível afirmar que o PLA não se degrada em meio aquático, uma vez que as condições de meio aquático são muito diferentes do ambiente terrestre devido à baixa temperatura e alta pressão [63].

Na Figura 4.4, está representado o nível de biodegradação do PLA nos diferentes ambientes, tal como referido anteriormente. Como se pode observar, a degradação do PLA ocorre mais facilmente em compostagem [64].

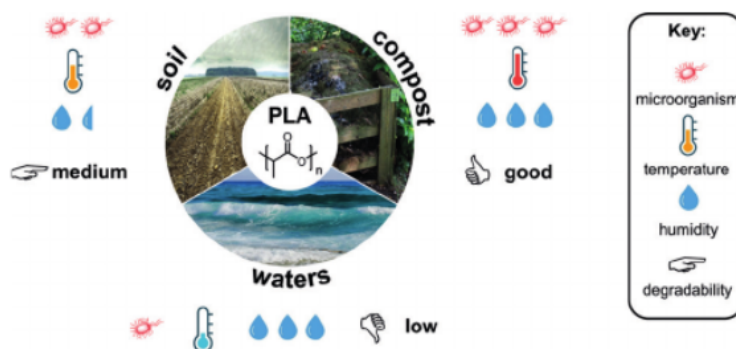


Figura 4.4: Biodegradação do PLA em diferentes ambientes [63].

4.2.2 Análise do Ciclo de Vida do Poliéster

Quanto às fibras de poliéster, estas correspondem às fibras sintéticas mais utilizadas em todo o mundo. Durante o seu processo de produção são as que gastam menos

água, porém são as que apresentam um maior impacto no ambiente. Estas fibras, como são obtidas a partir de combustíveis fósseis, na sua fase de produção necessitam de um elevado nível de energia [65].

Relativamente à Análise do Ciclo de Vida do poliéster, considera-se o método *cradle to grave*, que inclui as etapas seguintes:

- Produção de fibra de resina (polimerização);
- Produção de fio (fição, torção, texturização);
- Processo de preparação de tecelagem;
- Tecelagem;
- Acabamento;
- Embalagem;
- Armazenamento e distribuição;
- Utilização;
- Fim de vida [65].

A produção da fibra de poliéster tem como saídas emissões para a atmosfera e água de metais pesados, sais de cobalto e manganês, brometo de sódio, dióxido de titânio, óxido de antimônio e acetaldeído, o que não é muito vantajoso do ponto de vista ambiental [17].

Existem problemas ambientais na gestão de resíduos deste tipo de fibras, como a não biodegradabilidade, o que representam várias ameaças tóxicas tanto para o ambiente como para a saúde humana, que também são impactos negativos da produção de fibras sintéticas [17].

Um estudo demonstrou que para 1 kg de fibras de poliéster consomem-se cerca de 97,4 MJ de energia e 17,2 kg de água com emissões de 2,31 kg de CO_2 , 18,2 g de monóxido de carbono, 39,5 g de CH para a atmosfera e 3,2 g de emissões de água [17].

Quando se compara os impactos ambientais de uma fibra de algodão convencional com uma fibra de poliéster, estudos realizados, relativamente à ACV, demonstram que a fibra do algodão consome menos 40% de energia do que as fibras de poliéster [66].

Neste caso, o reaproveitamento de resíduos pode ser realizado através de reciclagem mecânica, química e energética. A reciclagem dos resíduos permite, em parte, resolver o problema ambiental bem como possibilitar o desenvolvimento de novos materiais a partir de compósitos que acrescentam maior valor ao material depois de ser consumido [66].

Alternativas de fim de vida

Na gestão de resíduos sólidos plásticos, existem diversas prioridades tais como a minimização da geração destes resíduos, através de mudanças de hábitos de consumo e a produção de produtos com menor quantidade de material, realizados de materiais recicláveis. Após a minimização da geração de resíduos, a atenção deverá ser o seu destino final, tal como, reciclagem, incineração e disposição em aterros sanitários. Tal como ocorre com o PLA, o poliéster também tem como alternativas de fim de vida os aterros sanitários, incineração, reciclagem química e mecânica [66].

- **Aterros sanitários:**

Os aterros correspondem a áreas para depósito de lixo que tem como objetivo isolar os resíduos do ambiente à sua volta, em especial do contacto com os lençóis freáticos. É considerada uma área preparada para receber resíduos sólidos urbanos [67].

O impacto dos plásticos em aterros é um tema bastante controverso, sendo que existem certos autores que defendem o facto dos plásticos serem prejudiciais a estes e diminuem a sua vida útil devido aos elevados volumes depositados, e outros que defendem o oposto, o facto de não haver problemas na disposição dos plásticos [67].

A grande parte dos plásticos não é biodegradável, mas sim fotodegradável. Graças a estas características não é aconselhado que os resíduos plásticos não biodegradáveis, como é o caso do poliéster, sejam depositados em aterros sanitários, visto que estes tem uma duração mais longa em relação à decomposição por parte dos microrganismos presentes no solo [67].

- **Incineração:**

A incineração é um processo de queima e descaracterização de resíduos sólidos, facilitando a sua deposição, visto que ocorre uma grande redução no volume do material final. Porém, este processo apresenta dois aspetos bastante negativos, a

emissão de gases a partir da combustão dos resíduos e o destino das cinzas resultantes dos sistemas de lavagem de gases. Um dos maiores problemas da incineração é a emissão de dioxinas e furanos. Posto isto, os investimentos neste sistema acabam por ser bastante elevados, visto que é necessário integrar um mecanismo de lavagem dos gases, que muitas vezes é mais caro do que o próprio forno de incineração [68].

- **Reciclagem mecânica:**

A reciclagem baseia-se na conversão de resíduos em matérias-primas para a produção de novos produtos. O processo de reciclagem mecânica de materiais plásticos é constituído por diversas fases. De maneira a garantir os parâmetros mínimos de qualidade dos plásticos reciclados, os resíduos devem ser processados de acordo com o tipo de polímero. Deste modo estabeleceu-se um sistema de código que permite identificar os diferentes tipos de polímero [67].

Depois da fase de separação, os resíduos são triturados e lavados com o objetivo de eliminar possíveis contaminantes. De seguida, ocorre a fase de aglutinação, onde ocorre o aumento da temperatura dos resíduos e a formação de uma massa plástica. Ainda nesta etapa, são introduzidos os aditivos que sejam necessários. Esta massa plástica, é então fundida e extrudida, adquirindo a forma de um cilindro de plástico, sendo arrefecido com água à saída da extrusora. Quando já se encontra a uma temperatura considerada baixa vai passar num granulador [67].

A reciclagem mecânica é considerada uma medida de gestão de resíduos sustentável quando comparado à incineração ou à deposição em aterros, visto que reduz o consumo de recursos materiais e energéticos, sendo que a reciclagem de plástico exige apenas 10% da energia utilizada para a produção de matérias-primas virgens, e também, as emissões gasosas com potencial para provocar o aquecimento global [67].

- **Reciclagem química:**

A reciclagem química de plásticos é baseada na decomposição de polímeros através de calor ou agentes químicos. Assim, através de diferentes processos, é possível obterem-se compostos químicos que podem ser utilizados em várias áreas da indústria.

Despolimerização química: Este processo consiste em promover a reação inversa à que deu origem ao polímero, ou seja, quebrar ligações existentes entre os monómeros que constituem o polímero. Vários processos de despolimerização foram desenvolvidos, categorizados tendo em conta o agente químico utilizado, sendo que os mais comuns são a glicólise, metanólise e hidrólise [69].

Gasificação: Neste caso, os resíduos são submetidos a uma atmosfera redutora que se encontra a temperaturas elevadas (700 e 1600°C). Ao contrário do que ocorre na incineração, durante este processo, apenas se dá a oxidação parcial dos materiais carbónicos, resultando na produção de um gás, *syngas* ou gás de síntese, que tem como constituintes o monóxido de carbono, o dióxido de carbono e o hidrogénio. Este gás apresenta um largo espectro de utilizações, tal como na indústria petroquímica e siderúrgica, podendo também ser utilizado diretamente como combustível. Tem ainda uma grande vantagem que é o processamento de materiais com diferentes características e graus de contaminação [69].

Capítulo 5

Materiais e métodos

Neste capítulo aborda-se todo o trabalho experimental realizado com as diferentes fibras, poliéster e PLA, tanto à escala laboratorial como à escala industrial.

5.1 Substrato e produtos utilizados

Como substrato para o tingimento das fibras foram utilizadas uma malha 100% Poliéster e uma 100% PLA. Ao longo deste trabalho foram realizados tingimentos tanto a nível laboratorial como a nível industrial às fibras de poliéster e PLA com o objetivo de se obter uma cor preta e uma roxa.

O procedimento realizado a nível laboratorial encontra-se na Figura 5.1



Figura 5.1: Sequência de processos realizados em laboratório.

O processo a nível industrial encontra-se nos subcapítulos seguintes, visto que este é específico para as diferentes matérias-primas.

5.2 Tingimento à escala laboratorial

Para iniciar o processo de tingimento em laboratório, é necessário, primeiramente, preparar a amostra. As malhas, tanto de PLA como Poliéster foram cortadas de modo a pesarem cerca de 5g.

As receitas usadas para estes tingimentos encontram-se nos subcapítulos seguintes dependendo do tipo de fibra e da cor que se pretende obter. Para realizar a pipetagem das soluções dos corantes utilizaram-se micropipetas, ou uma máquina de pipetagem que funciona automaticamente, representada na Figura 5.2.



Figura 5.2: Máquina de pipetagem automática.

As amostras foram, de seguida, enroladas, molhadas com água e colocadas nos tubos da máquina de tingimento que continham o respetivo banho de tingimento. Os tubos foram fechados e encaixados na máquina de maneira equilibrada.

O tingimento foi realizado em máquinas do tipo Mathis Labomat, tal como se pode observar pela Figura 5.3, carregadas, no máximo, com doze tubos que têm uma capacidade de 50 cm³ de banho, sendo que um deles levava uma sonda para controlar a temperatura.

Para o tingimento do PLA, os tubos encontram-se em rotação na máquina de tingir cerca de 30 minutos a 110°C. Por outro lado, para o tingimento do poliéster os tubos estão em rotação na máquina cerca de 90 minutos a 130°C.



Figura 5.3: Máquina de Tingimento.

A lavagem das amostras foi também realizada na máquina de lavagem da Figura 5.3. Para a fibra de PLA, realizou-se uma lavagem a 60°C durante 15 minutos. Para o poliéster, a lavagem é dividida em três partes, sendo que a primeira é realizada a 80°C durante um período de 15 minutos, a segunda ocorre também a 80°C durante 10 minutos e por fim, a terceira parte realiza-se a 35°C durante 10 minutos. Depois da lavagem, as amostras foram centrifugadas durante 1 minuto e estendidas numa estufa a 100°C de modo a secarem durante 5 minutos.

Após todo este processo, foram recolhidas quatro amostras no sentido de realizar avaliação do pH, gramagem, diferença de cor e análise microscópica. Ou seja, uma amostra tingida a preto de poliéster, uma amostra tingida a roxo de poliéster, uma amostra tingida a preto de PLA, e uma amostra tingida a roxo de PLA.

5.2.1 Tingimento a preto em Poliéster

Para se fazer o tingimento a preto em poliéster utilizou-se um corante e três soluções auxiliares, seguindo-se a receita apresentada na Tabela 5.1, sendo que foi calculada tendo em conta um RB= $8 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e uma massa de 5 g. O RB corresponde à relação do banho. Na Tabela 5.1 encontram-se as concentrações dos corantes e das soluções auxiliares, bem como o volume a pipetar para o banho. Este tingimento foi realizado a uma temperatura de 130°C.

Tabela 5.1: Receita de tingimento a preto calculada para RB= $8 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e m= 5g.

Corante	Concentração (g/L)	Volume (mL)
Bemacron Black HP-S	4	10
Auxiliares		
Peroftal L	2	3,2
Toxal Buf-4	2,5	1
Seragal P-NSD	1	0,4
Água		25
Total		40

Relativamente à lavagem, tal como referido, esta é dividida em três etapas. Na primeira etapa, adicionou-se soda cáustica e Rucorit rgh e colocou-se na máquina de lavagem durante 15 minutos a 80°C. Nesta lavagem não se utilizou hidrossulfito de sódio uma vez que o Rucorit rgh apresenta um potencial de redução superior ao do hidrossulfito de sódio a temperaturas mais elevadas. A segunda lavagem é realizada com ácido cítrico a 80°C durante 10 minutos. Na última lavagem, utilizou-se apenas água durante 10 minutos a 35°C.

De seguida, na Figura 5.4, encontra-se o resultado do tingimento a preto no poliéster.



Figura 5.4: Poliéster tingido a preto em laboratório.

Tal como se pôde observar por comparação com a referência, a cor foi de encontro ao esperado bem como o toque.

5.2.2 Tingimento a roxo em Poliéster

De modo a realizar o tingimento a roxo em poliéster foi necessário três corantes diferentes e quatro soluções auxiliares. Na Tabela 5.2 encontra-se a receita que foi utilizada, estando apresentados todos os reagentes utilizados, a respetiva concentração e volume necessário. Esta receita foi calculada para um RB de $8 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e uma massa de 5g. Este tingimento também foi realizado a 130°C .

Tabela 5.2: Receita de tingimento a roxo calculada para RB= $8 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e m= 5g.

Corante	Concentração (g/L)	Volume (mL)
Dianix Navy XF	1,37	3,43
Dianix Rubi XFS	0,73	7,3
Dianix Yellow Brown XF	0,20	2
Auxiliares		
Seracon PN-R	3	1,2
Seragal P-NSD	1	0,4
Toxal Buf 4	2,5	1
Água		25
Total		40

A lavagem, neste caso, é realizada da mesma forma do processo anterior.

Na Figura 5.5, encontra-se a amostra obtida do poliéster tingido a roxo em laboratório.



Figura 5.5: Poliéster tingido a roxo em laboratório.

Neste caso, tanto a cor como o toque resultantes, apresentaram características que foram de encontro ao habitual.

5.2.3 Tingimento a preto em PLA

Em relação ao tingimento do PLA, foi necessário ter mais cuidados uma vez que esta fibra é muito sensível. A temperatura de tingimento foi de 110°C.

Para obter a cor preta foram necessários três corantes e duas soluções auxiliares. Na Tabela 5.3 encontram-se todos os corantes e auxiliares utilizados para este tingimento, juntamente com as respetivas concentrações e volumes necessários para o banho. Esta receita foi calculada para um RB de $10 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e uma amostra com massa de 5g.

Tabela 5.3: Receita de tingimento a preto calculada para $RB= 10 \text{ cm}^3\text{g}^{-1}$ e $m= 5\text{g}$.

Corante	Concentração (g/L)	Volume (mL)
Dianix Navy XF	0,4	1
Dianix Preto XF	4,2	10,5
Dianix Rubi XFS	0,046	0,46
Auxiliares		
Seracon PN-R	3	1,5
Acetato de sódio	1	0,5
Água		36
Total		50

A lavagem, em PLA, ocorre apenas com hidrossulfito de sódio. Esta lavagem tem a duração de 15 minutos a 60°C . Neste caso, como se trabalhou a temperaturas mais baixas, como a fibra assim o pede, utilizou-se o hidrossulfito de sódio, que tem uma capacidade de redução suficiente para a temperatura em questão.

Na Figura 5.6 está apresentada a amostra obtida de PLA tingido a preto em laboratório.



Figura 5.6: PLA tingido a preto em laboratório.

Na amostra de PLA tingida a preto em laboratório, a cor não ficou como o esperado, bem como o toque. No capítulo 6, serão abordadas as diferenças de cor, onde ficará mais nítido esta disparidade.

5.2.4 Tingimento a roxo em PLA

Relativamente ao tingimento do PLA a roxo, foram necessários três corantes diferentes e quatro soluções auxiliares. Na Tabela 5.4 estão apresentados todos estes produtos utilizados no tingimento. Esta receita foi calculada para um RB de $10 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e uma amostra com massa de 5g.

Este tingimento demorou cerca de 30 minutos a 110°C e a lavagem 15 minutos a 60°C .

Tabela 5.4: Receita de tingimento a roxo calculada para RB= $10 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ e m= 5g.

Corante	Concentração (g/L)	Volume (mL)
Dianix Navy XF	1,37	3,43
Dionix Rubi XFS	0,73	7,3
Dionix Yellow Brown XF	0,2	2
Auxiliares		
Seracon P-NR	3	1,5
Seragal PN-SD	1	0,5
Persoftal -L	2	4
Acetato de sódio	1	0,5
Água		31
Total		50

Os corantes utilizados para o tingimento a roxo de poliéster e o de PLA foram os mesmos, nas mesmas concentrações. A lavagem realizada neste tingimento, foi igual à lavagem do PLA tingido a preto. Na Figura 5.7, está apresentado o resultado da amostra obtida de PLA tingida a roxo em laboratório.



Figura 5.7: Tingimento de PLA a roxo em laboratório.

Tal como se pode observar pela Figura 5.7, a cor obtida não foi a expectável. Contudo, isto pode-se justificar pelo facto de se ter utilizado os mesmos corantes tanto para o poliéster como para o PLA. Tendo em conta que são fibras diferentes, não se poderia usar a mesma receita para se obter a mesma cor.

5.3 Tingimento à escala industrial

O processo de tingimento à escala industrial varia tendo em conta a matéria-prima. Visto que o PLA é uma fibra mais sensível que o poliéster, o processo de tingimento tem de ser diferente. Estes processos serão explicados de seguida.

Após a realização do processo industrial, foram também recolhidas quatro amostras de modo a avaliar todas as características referidas anteriormente.

5.3.1 Tingimento de Poliéster 100 % Reciclado

Para a produção de um produto 100% Poliéster Reciclado, sendo neste caso uma t-shirt, é necessário ter em conta diversas etapas, tais como a preparação da matéria-prima, a fição, a tecelagem, a preparação para o tingimento, o tingimento, a estamparia, os acabamentos químicos e mecânicos e a confeção. Nesta dissertação, será analisada e estudada a etapa do tingimento. A matéria-prima adquirida de Poliéster 100% Reciclado tem um custo de 2,80 €/kg.

De forma a simplificar este processo, na Figura 5.8 encontra-se um diagrama que apresenta todo o processo de produção, desde a chegada da matéria-prima até ao produto estar pronto a entregar ao cliente.

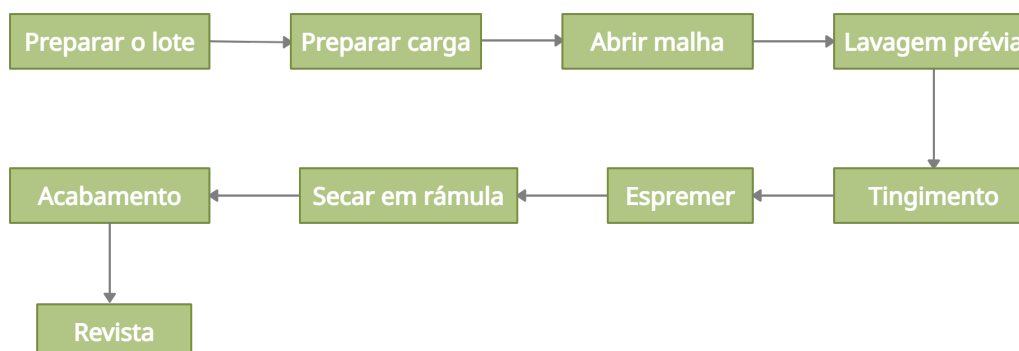


Figura 5.8: Processo produtivo do Poliéster 100% Reciclado.

De seguida, serão explicadas as operações deste processo:

- **Lavagem:** Esta etapa tem como principal objetivo retirar óleos que possam existir;
- **Tingimento:** O tingimento é um processo de coloração durante o qual a totalidade do material absorve o corante, sendo que este é aplicado uniformemente, embora possa não ser absorvido uniformemente. Este tingimento foi realizado utilizando corantes dispersos. São designados por dispersos uma vez que são muito pouco solúveis em água, e são normalmente aplicados por intermédio de dispersões. Contudo, quando são aplicados através de um meio aquoso é a quantidade de corante na solução que é absorvida pela fibra. Esta absorção é seguida de dissolução de mais corante e assim sucessivamente.

Fornece-se, mais uma vez, temperatura (130°C) de modo que o poliéster absorva o corante.

Ainda na operação do tingimento, é realizada uma lavagem redutora, que tem como objetivo retirar o excesso de corante que não migrou para o interior da fibra.

- **Espremer:** Retirar o excesso de solvente.
- **Secar em râmula:** Tem como funções secar a malha, acertar a trama e estabilizar a largura.
- **Acabamento:** Tem como objetivo proporcionar características que tornem o material funcional, tal como toque, resistência, estabilidade dimensional, densidade e aparência.
- **Revista:** Esta operação tem como objetivo garantir que o produto final está conforme o pretendido.

Na Figura 5.9, encontra-se o gráfico do processo de tingimento do poliéster 100% Reciclado, onde está apresentado o tempo em função da temperatura.

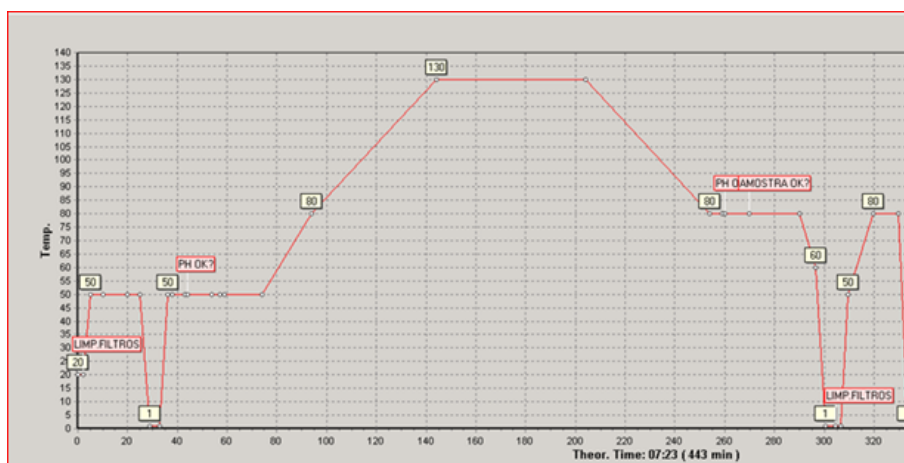


Figura 5.9: Processo do tingimento do poliéster, tempo em função da temperatura.

Como se pode observar pelo gráfico, até ao ponto 1 faz-se a preparação da máquina. A temperatura sobe até aos 50°C e faz-se o controlo de pH, sendo que este tem de ser ácido. Ocorre outro aumento de temperatura até aos 130°C e dá-se, então, o tingimento, que tem a duração de 60 minutos. A temperatura desce novamente até aos 80°C e faz-se novo controlo de pH. De seguida, volta-se a fazer uma limpeza de filtros de modo a realizar uma lavagem, atingindo uma temperatura de 80°C.

Na Figura 5.10 encontra-se uma amostra obtida do tingimento realizado à escala industrial.



Figura 5.10: Poliéster tingido a preto a escala industrial.

Tal como se pôde observar, a nível de cor, encontra-se dentro do previsto e o toque também foi o esperado. Não se realizou o tingimento a roxo no poliéster à escala industrial uma vez que o processo seria exatamente o mesmo que o do tingimento a preto, não existindo esta necessidade.

5.3.2 Tingimento de PLA

Foram realizados dois tingimentos à escala industrial de PLA, sendo que um tingimento foi realizado a preto e outro a roxo. Para o tingimento a preto, utilizou-se uma massa de 15 kg e para o tingimento a roxo utilizou-se uma massa de 8 kg. O custo desta matéria-prima é de 9,55 €/kg.

Para os dois tingimentos seguiu-se o roteiro que está apresentado na Figura 5.11, sendo detalhada cada etapa do processo seguidamente.

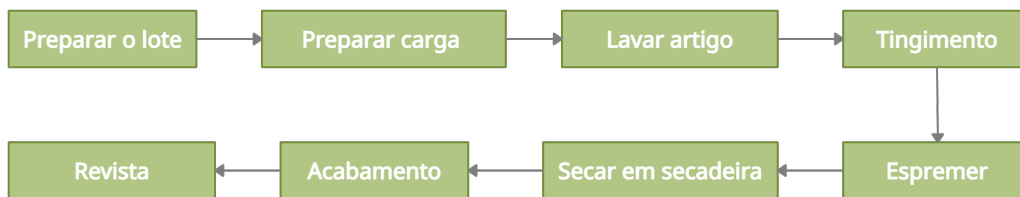


Figura 5.11: Processo produtivo do PLA.

- **Preparação da carga:** Esta etapa tem como objetivo verificar se o material apresenta algum tipo de defeitos, como rasgões, buracos, sujidade, entre outros. De seguida, a malha vai ficar organizada em paletes até seguir para a próxima etapa. Nas Figuras 5.12, encontra-se a respetiva máquina para a realização desta operação, que corresponde à máquina T136.



Figura 5.12: Máquina de preparação do artigo.

- **Lavagem:** Esta etapa tem, também como principal objetivo retirar óleos que possam existir. Esta operação ocorre na máquina T180.

- **Tingimento:** As fibras de PLA, tal como as do poliéster são tingidas com corantes dispersos. Uma vez que o PLA apresenta uma estrutura cristalina bastante amorfa, a temperatura crítica de montagem dos corantes é menos 20°C que a do poliéster. A permanência da fibra à temperatura final não deve ir além dos 30 minutos para evitar a sua degradação por hidrólise.

A temperatura máxima atingida foi de 110°C. Nas Figuras 5.13 encontra-se a máquina de tingimento utilizadas. Como se pode observar na Figura do lado direito, o tecido passa por um tubo onde atua o jato (*Jet*), sendo de seguida depositado num banho onde permanece durante algum tempo. A máquina utilizada para esta etapa é, também, a T180.



Figura 5.13: Máquina de tingimento, "Jet".

- **Espremer:** Nesta operação, retira-se o excesso de solvente, como nas fibras de poliéster. Utiliza-se a máquina t123.



Figura 5.14: Máquina de abrir e espremer.

- **Secar em secadeira:** Ao contrário da operação de secar em râmula, neste caso, quando o produto se encontra na secadeira apenas vai sofrer secagem. Esta operação ocorre na máquina A309.



Figura 5.15: Secadeira.

Como o PLA é uma fibra muito sensível à temperatura, a temperatura na secadeira não deve exceder os 110°C.

- **Acabamento:** O principal objetivo desta etapa é garantir determinadas características que tornem o material funcional;



Figura 5.16: Máquina de acabamento.

O acabamento aplicado neste produto foi o *Bio Ative*. Este acabamento é um antibacteriano biodegradável. Permite que a roupa seja lavada menos vezes, a temperaturas mais baixas, entre 20 a 30°C, sendo suficiente para matar todas as bactérias, levando assim a uma redução do consumo de energia.

- **Revista:** Nesta operação, revê-se o produto de maneira a confirmar que está de acordo com o pretendido.

Tingimento a preto no PLA à escala industrial

Na Figura 5.17, encontra-se o gráfico do processo de tingimento do PLA a preto, onde está representado o tempo em função da temperatura, sendo que o tingimento foi realizado com um pH entre 4,5 e 5.

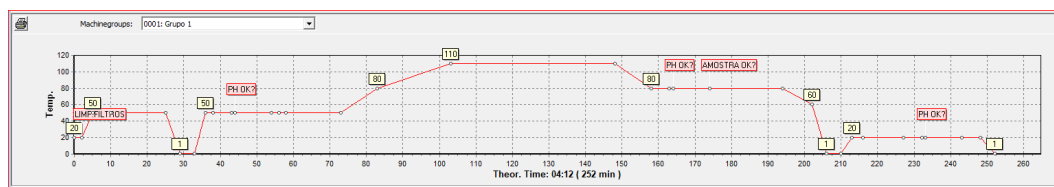


Figura 5.17: Processo de tingimento do PLA a preto, tempo em função da temperatura.

Segundo o gráfico, até ao ponto 1 ocorre a limpeza dos filtros e a preparação da máquina. De seguida entram os auxiliares e corantes, em simultâneo. A temperatura irá subir até aos 50°C e faz-se o controlo de pH. A partir dos 110°C inicia-se o

tingimento, tendo a duração de 45 minutos. De seguida, a temperatura volta aos 80°C de modo que seja possível verificar o pH ácido. Ocorre outra diminuição de temperatura até aos 60°C e faz-se uma lavagem a frio. Esta lavagem ocorre desde os 208 minutos até aos 253 minutos.

Na Figura 5.18, encontra-se a amostra obtida do processo industrial do tingimento do PLA.

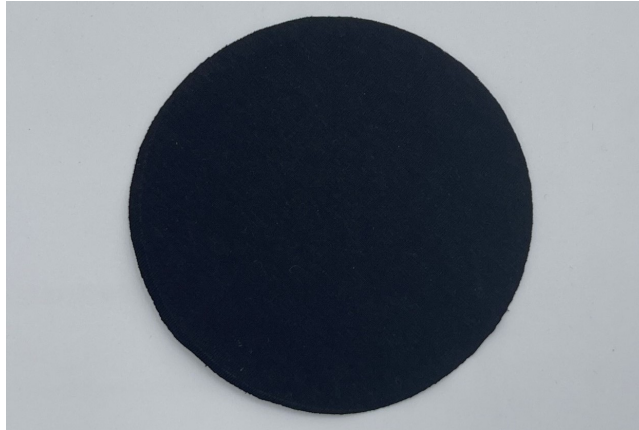


Figura 5.18: Tingimento em PLA a preto a escala industrial.

Tal como se pôde observar, a cor obtida não foi a esperada, a malha de PLA apresentou um tom acastanhado. A malha de PLA e o corante foram testados, posteriormente, na empresa fornecedora do pigmento, DyStar, para perceber se o problema seria do corante, do PLA, ou da forma de tingimento. No entanto, não foi possível chegar a uma justificação válida.

Verificou-se que a partir do pH de 4,2 a malha começou a acastanhar, o que significa que o tingimento do PLA teria de ser abaixo de 4,2, nunca atingindo os 4,5 que estavam definidos inicialmente.

Assim, é possível justificar o facto do tom final ter sido acastanhado pela influência que o valor do pH pode ter na afinidade do corante para com a fibra, efeito esse que deverá ser estudado para o corante em causa quando aplicado ao PLA.

Por outro lado, o toque da malha, depois de todo o processo, também não ficou de acordo com o esperado. O toque resultante foi áspero e rugoso, dando uma sensação seca ao material. Na secadeira, apesar da temperatura ser 130°C, o próprio material nunca atinge esta temperatura porque está em movimento com uma determinada velocidade, neste caso de 28 m/min, ou seja, nunca passa dos 70/80°C, temperatura suportada pelo PLA. Posto isto, aquilo que poderá ter acontecido foi a

malha ter ficado presa nos próprios rolos da secadeira, fazendo com que esta atingisse uma temperatura mais elevada do que a suportada pela mesma, provocando assim um toque mais áspero.

Tingimento a roxo no PLA à escala industrial

Na Figura 5.19, encontra-se o gráfico do processo de tingimento de PLA a roxo, sendo que está representado o tempo em função da temperatura.

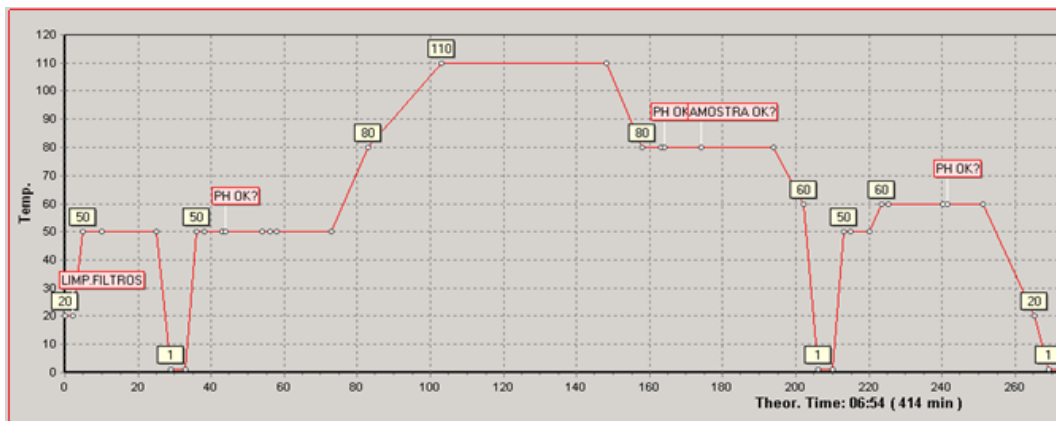


Figura 5.19: Processo de tingimento do PLA a roxo, tempo em função da temperatura.

Segundo o gráfico da Figura 5.19 até ao ponto 1, ocorre a limpeza dos filtros e a preparação dos filtros. A temperatura sobe até aos 50°C e faz-se o controlo de pH. Quando a temperatura atinge os 110°C ocorre o tingimento, tendo uma duração de, aproximadamente, 45 minutos. De seguida, a temperatura volta a baixar até aos 80°C, onde se volta a fazer novo controlo de pH. Ocorre outra diminuição de temperatura até aos 60°C e faz-se uma lavagem a frio. Esta lavagem ocorre desde os 224 minutos até aos 250 minutos.

Na Figura 5.20, está apresentado a amostra obtida do processo de tingimento a roxo do PLA.



Figura 5.20: Tingimento em PLA a roxo a escala industrial.

Tal como se pode observar, a cor obtida foi de encontro ao esperado. Contudo, o toque final não foi o expectável visto que se obteve um toque áspero, tal como aconteceu com o PLA tingido a preto.

5.4 Controlo de qualidade

5.4.1 Avaliação da diferença de cor

Para realizar o ensaio de diferença de cor, utilizou-se o equipamento que se encontra na Figura 5.21. Para se fazer a medição da diferença de cor, teve que se utilizar um padrão, neste caso para o preto e roxo. Assim, escolheram-se dois pantones para servirem como padrão, sendo que de seguida comparou-se com as amostras obtidas, tanto em laboratório como em indústria.

A tolerância máxima de ΔE aceite pela empresa corresponde a 1,5 (CIElab).

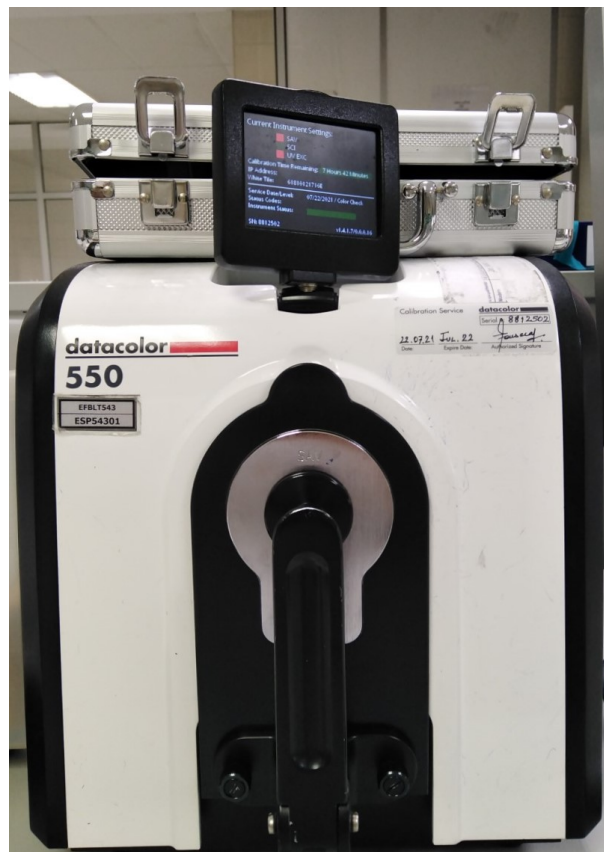


Figura 5.21: Espectrofotômetro colorimétrico.

5.4.2 Avaliação do pH

A avaliação do pH do extrato aquoso de têxteis é um importante índice, devido às exigências em relação à alcalinidade e acidez dos materiais.

Existem diversos métodos para a medição de pH de uma amostra sólida, tendo sido utilizado o equipamento Morapex-A, mostrado na Figura 5.22, de acordo com método interno da empresa.

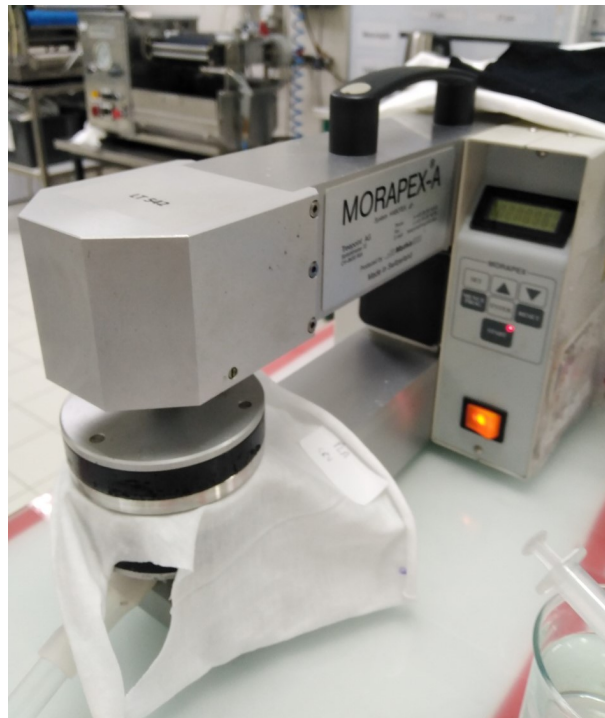


Figura 5.22: Equipamento utilizado para medir o pH.

Tal como se pode observar, a amostra é colocada na área circular, sendo que ocorre uma extração de amostra líquida. São recolhidos cerca de 5 mL desta amostra e posteriormente são adicionadas 5 gotas de indicador de pH, quando a amostra é incolor. Agitando-se a amostra obtém-se uma tonalidade da solução, sendo que esta é comparada com a escala do pH, obtendo-se assim o valor deste. Quando a amostra não é incolor, ou seja, quando apresenta uma determinada tonalidade, mede-se o pH diretamente no eletrodo.

5.4.3 Avaliação da gramagem

Relativamente à avaliação da gramagem, esta consiste na massa por unidade de área, ou seja em gramas por m^2 de um artigo. Para realizar esta determinação utiliza-se um Método Interno baseado no Método NEXT- TM 20.

Capítulo 6

Resultados e discussão

Ao longo deste capítulo serão analisados e discutidos os resultados obtidos relativamente aos tingimentos realizados tanto em poliéster como em PLA, à escala laboratorial e industrial e os resultados obtidos em relação aos consumos de cada processo, desde o estado cru da malha até ao produto final.

6.1 Avaliação da diferença de cor

Para a realização deste ensaio utilizou-se o método referido no capítulo 5. Na Tabela 6.1 encontram-se apresentados os resultados obtidos para a avaliação da diferença de cor.

Tabela 6.1: Resultados obtidos para o ΔE .

Matéria-prima	Tipo de tingimento	ΔE
Poliéster	Preto laboratório	1,99
	Preto produção	1,90
	Roxo laboratório	3,60
	Roxo produção	3,63
PLA	Preto laboratório	5,72
	Preto produção	7,53
	Roxo laboratório	7,35
	Roxo produção	7,17

Tal como se pode observar, em relação ao PLA tingido a roxo, obteve-se um grande desvio. Isto aconteceu porque se utilizou a mesma receita tanto para o poliéster como para o PLA, e como são fibras diferentes, certamente deveria fazer-se ajustes no tingimento da fibra base PLA.

Na Figura 6.1, encontram-se todas as amostras obtidas, os Pantones que foram usados como padrões e o seu respetivo ΔE .

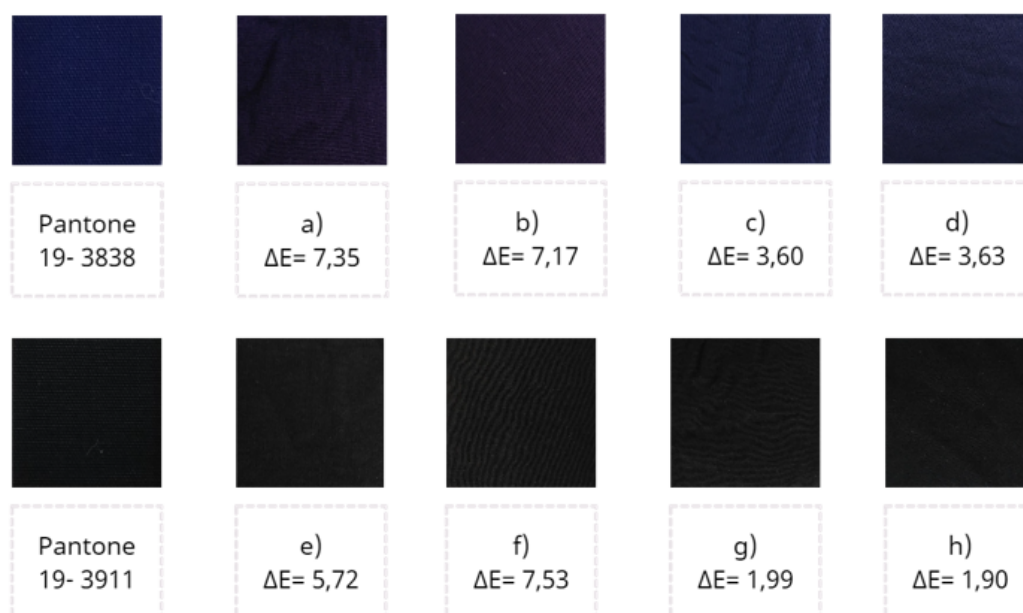


Figura 6.1: Avaliação do ΔE a) PLA tingido a roxo em laboratório; b) PLA tingido a roxo em produção; c) Poliéster tingido a roxo em laboratório; d) Poliéster tingido a roxo em produção; e) PLA tingido a preto em laboratório; f) PLA tingido a preto em produção; g) Poliéster tingido a preto em laboratório; h) Poliéster tingido a preto em produção.

Tal como se pode observar, as amostras a) e b), que correspondem ao PLA tingido a roxo em laboratório e produção, respetivamente, apresentam um grande desvio quando comparado com o Pantone, visto que a receita foi pensada para poliéster e não para PLA. Posto isto, ter-se-ia que ajustar esta receita ao PLA de modo a obter um erro inferior. Em relação às amostras e) e f), PLA tingido a preto em laboratório e produção, respetivamente, o desvio foi também bastante elevado. Este resultado já se esperava, porque mesmo visualmente, notava-se uma grande diferença de tonalidade.

Por outro lado, as amostras c), d), g) e h) poliéster tingido a roxo em laboratório e em indústria e poliéster tingido a preto em laboratório e em indústria, respetivamente, apresentam um erro inferior, quando comparado ao PLA isto porque as receitas foram realizadas para a fibra de poliéster. Como já referido anteriormente, seria necessário fazer ajustes nas receitas para a realização dos tingimentos em PLA.

6.2 Avaliação do pH

Para a avaliação do pH, utilizou-se um método interno referido no capítulo 5.

Na Tabela 6.2, encontram-se todos os valores de pH das amostras obtidas.

Tabela 6.2: Resultados obtidos para o pH das amostras.

Matéria-prima	Tipo de tingimento	pH
Poliéster	Cru	6,00
	Preto Laboratório	5,70
	Preto Produção	6,66
	Roxo Laboratório	7,00
	Roxo Produção	7,00
PLA	Cru	4,00
	Preto Laboratório	6,32
	Preto Produção	3,70
	Roxo Laboratório	7,11
	Roxo Produção	6,01

Tal como se pode observar pela Tabela 6.2, a fibra de PLA apresenta um pH mais ácido em comparação ao poliéster. Contudo, quando esta fibra sofre tingimento o pH varia bastante entre os valores 3 e 7. Por outro lado, quando o poliéster sofre tingimento o pH varia entre os valores 5 e 7, apresentando uma menor variação.

O pH obtido no tingimento da fibra de PLA a preto de produção, foi demasiado ácido. Este valor pode ser justificado pelo facto de ter sofrido uma má neutralização. Apesar de ter sido realizado um banho de acabamento, a fibra não ficou bem neutralizada. Isto poderá ser corrigido, realizando-se uma nova neutralização de modo a se obter um pH mais neutro.

6.3 Avaliação da gramagem

Para a avaliação da gramagem, utilizou-se também um método interno referido anteriormente. De seguida, na Tabela 6.3, encontram-se todos os resultados obtidos relativamente à determinação da gramagem.

Tabela 6.3: Resultados obtidos da gramagem das diferentes amostras

Matéria-prima	Tipo de tingimento	Gramagem (g/m ²)
Poliéster	Cru	145
	Preto Laboratório	208
	Preto Produção	209
	Roxo Laboratório	210
	Roxo Produção	204
PLA	Cru	165
	Preto Laboratório	250
	Preto Produção	235
	Roxo Laboratório	225
	Roxo Produção	220

Tal como se pode observar pela Tabela 6.3, o PLA apresenta uma gramagem superior em relação ao poliéster. Como seria de esperar, as matérias-primas cruas revelam uma gramagem inferior às tingidas, tanto em laboratório como em produção. Isto pode-se justificar pelo facto de quando as fibras são submetidas a temperaturas elevadas, ou quando entram em contacto com a água, como acontece no tingimento, vai ocorrer o relaxamento das fibras, fazendo com que o peso destas aumente.

6.4 Microscopia das fibras

O microscópio é das principais ferramentas para a análise de fibras, tanto vegetais como sintéticas.

Para realizar os ensaios de identificação de fibras têxteis, por microscopia dos cortes longitudinal e transversal utilizaram-se as amostras de fibras de PLA e poliéster obtidas, tendo em conta um Método Interno utilizado.

6.4.1 Corte Longitudinal

Para realizar o corte longitudinal das fibras, começou-se por retirar um fio da fibra. Este fio é depositado na lâmina juntamente com uma gota de solvente, sendo neste caso glicerina. Os materiais foram analisados em microscópio ótico. As ampliações realizadas corresponderam a 200X.

Nas Figuras seguintes, encontram-se todos os resultados da análise realizada do corte longitudinal das fibras de PLA e poliéster.

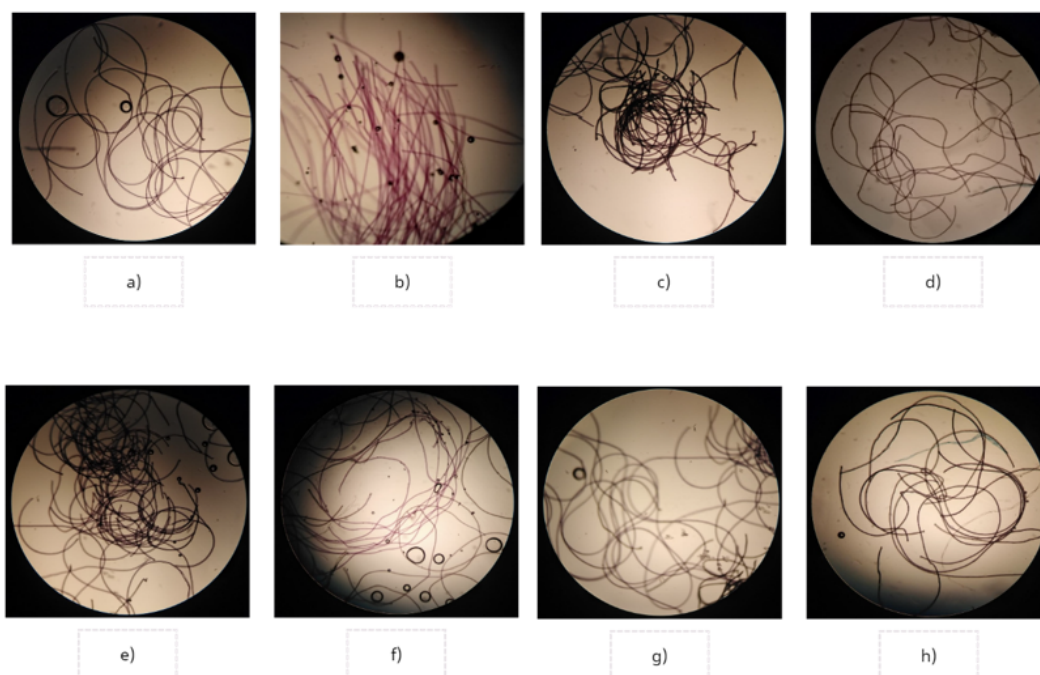


Figura 6.2: Microscopia longitudinal das fibras. a) PLA tingido a roxo em laboratório; b) PLA tingido a roxo em produção; c) PLA tingido a preto em laboratório; d) PLA tingido a preto em produção; e) Poliéster tingido a roxo em laboratório; f) Poliéster tingido a roxo em produção; g) Poliéster tingido a preto em laboratório; h) Poliéster tingido a preto em produção.

As amostras obtidas de PLA, tal como se encontram nas Figuras a), b), c) e d), demonstram que as fibras sofreram degradação química ou térmica, isto devido aos pequenos cortes que a fibra apresenta.

As amostras de poliéster, e), f), g) e h) apresentam uma morfologia considerada normal para o material em questão, não indicando qualquer tipo de degradação química ou térmica.

6.4.2 Corte Transversal

Para o corte transversal, foi necessário preparar um suporte de cortiça e utilizar cola líquida para encapsular a fibra, junto ao suporte, de modo a deixá-la centralizada para realizar o corte transversal. Após se colocar a cola líquida teve que se esperar 1 hora até secar completamente. Assim que esta se encontrou completamente seca, realizaram-se os cortes transversais de modo a obter a secção pretendida.

Na Figura 6.3, encontram-se os resultados da análise do corte transversal. Esta análise apenas foi feita para duas amostras, uma de PLA e outra de poliéster uma vez que a geometria das fibras não varia tendo em conta os tingimentos. As amostras foram analisadas recorrendo a um microscópio ótico, sendo que as ampliações realizadas foram de 500X.

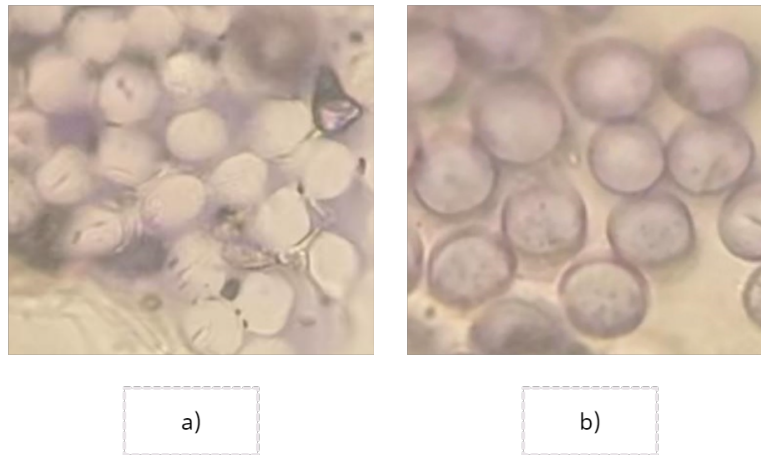


Figura 6.3: Microscopia transversal das fibras. a) PLA tingido a roxo em produção; b) Poliéster tingido a roxo em produção.

Tal como que se pode visualizar pela Figura 6.3, é possível verificar um padrão celular tanto para o PLA como o poliéster. A geometria celular destas duas fibras é bastante idêntica, apresentando uma forma circular.

6.5 Consumos para a produção de um produto de Poliéster

Foram levantados todos os consumos de água, de produtos químicos e energéticos relativamente ao processo de produção do poliéster de modo que seja possível fazer a Análise do Ciclo de Vida deste produto e posteriormente comparar com o produto desenvolvido a partir do PLA.

Na Tabela 6.4 encontram-se todos os consumos referidos anteriormente para cada operação do processo do tingimento, tendo como referência uma malha de 325 kg e 920 m.

Tabela 6.4: Consumos relativos ao Tingimento de um poliéster 100% Reciclado.

Consumos	Lavagem	Tingimento	Espremer	Secar em râmula	Acabamento Revista
Água (m ³)	2,6	5,2	0	0	0,2
Produtos Químicos (kg)	5,2	32,3	0	0	0
Energia Elétrica (kWh)	17,5	178	11,5	174	239
Gás Natural (m ³)	14,2	86,3	0	21,1	21,0

Por outro lado, na Tabela 6.5 encontram-se apresentados todos os consumos em termos monetários relativos a cada etapa do processo do tingimento. No Anexo A, encontra-se um exemplo de cálculo para cada consumo.

Tabela 6.5: Consumos de água, químicos e energéticos relativos ao poliéster 100% reciclado.

Consumos	Lavagem	Tingimento	Espremer	Secar em râmula	Acabamento Revista
Água (€)	2,60	5,20	0	0	0,20
Químicos (€)	9,85	47,44	0	0	0
Energia Elétrica (€)	1,75	17,83	1,15	17,43	23,92
Gás Natural (€)	3,26	19,84	0	4,85	4,83
Total (€)	17,4	90,3	1,15	22,2	28,9

É importante salientar que os consumos energéticos estão divididos em dois parâmetros, energia elétrica e gás natural.

Segundo a Tabela 6.4, e tendo em conta que se utilizou 325 kg de malha, pode-se afirmar que para 1 kg desta malha, foram necessários cerca de 16 kg de água durante o processo. Segundo a literatura, para 1 kg de poliéster gastar-se-ia cerca de 17,2 kg de água, o que indica que a malha de poliéster 100 % reciclado consome ligeiramente menos água do que uma malha de poliéster convencional.

Tal como se pode observar pela Tabela 6.5, as etapas que exigem maiores consumos totais são as etapas de tingimento e acabamento. Por outro lado, as etapas que requerem menos consumos são as da revista e de espremer.

Assim, o processo completo do tingimento para um poliéster 100 % reciclado apresenta um custo de 160,58 €, tendo em conta 325 kg de malha. É de referir, que na etapa do tingimento não se considerou os corantes utilizados e na etapa dos acabamentos não se teve em conta os acabamentos por motivos de confidencialidade do processo.

No gráfico da Figura 6.4, encontram-se representados todos os consumos no processo do tingimento.

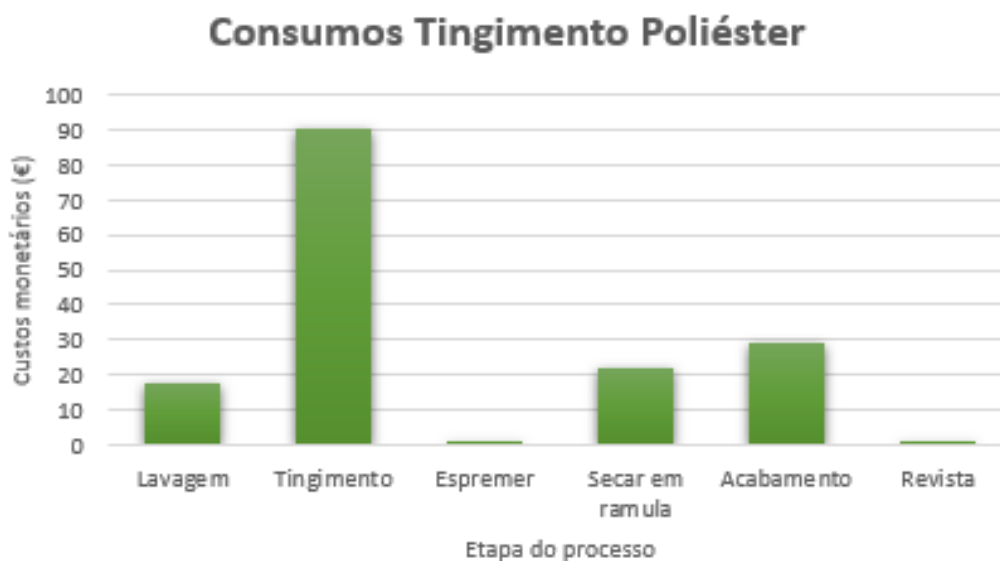


Figura 6.4: Consumos relativos ao processo de produção do Poliéster 100% Reciclado.

Tal como se pode observar pelo gráfico, as etapas que têm mais relevância a nível de consumos são os processos de tingimento e acabamento. O processo de espremer e da revista são vestigiais relativamente aos consumos, uma vez que apresentam custos reduzidos.

Relativamente às emissões de CO_2 , considerou-se apenas o gás natural uma vez que a energia elétrica utilizada neste processo é proveniente de fontes renováveis.

Assim, as emissões de CO_2 geradas neste processo correspondem a 319,42 kg de CO_2 , sendo que o cálculo destas emissões se encontram no Anexo A.4.

6.6 Consumos para a produção de um produto de PLA

Neste caso, foram também levantados todos os consumos de água, de produtos químicos e energéticos relativamente ao processo de tingimento de modo que seja possível fazer a Análise do Ciclo de Vida deste produto e comparar com o poliéster de forma a concluir qual o mais vantajoso em termos monetários e qual é o mais vantajoso a nível ambiental.

Na Tabela 5.3 encontram-se todos os consumos referidos anteriormente para cada operação do processo do tingimento, tendo como referência uma malha de com 325 kg, tal como a do poliéster de modo a obter uma comparação mais exata.

Na Tabela 6.6, encontram-se todos os consumos necessários para a produção de um produto de PLA. Estes consumos encontram-se divididos pelas diferentes etapas do processo, lavagem, tingimento, espremer, secar, acabamento e revista.

Tabela 6.6: Consumos de água, químicos e energéticos relativos ao PLA.

Consumos	Lavagem	Tingimento	Espremer	Secar em secadeira	Acabamento	Revista
Água (m ³)	2,6	5,2	0	0	0,2	0
Químicos (kg)	5,2	19,5	0	0	0	0
Energia Elétrica (kWh)	17,5	129,5	11,5	51,2	239	4,6
Gás Natural (m ³)	14,2	46,75	0	18,2	21	0

Por outro lado, na Tabela 6.7 encontram-se apresentados todos os consumos em termos monetários relativos a cada etapa do processo do tingimento. No Anexo B, encontram-se os exemplos de cálculos que foram necessários para chegar a estes valores.

Tabela 6.7: Consumos monetários de água, químicos e energéticos relativos ao PLA.

Consumos	Lavagem	Tingimento	Espremer	Secar em secadeira	Acabamento	Revista
Água (€)	2,60	5,20	0	0	0,2	0
Químicos (€)	9,85	30,24	0	0	–	0
Energia Elétrica (€)	1,75	12,95	1,15	5,12	23,93	0,46
Gás Natural (€)	3,26	10,75	0	4,18	4,83	0
Total (€)	17,46	59,15	1,15	9,30	28,93	0,46

Através da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.6, pode-se afirmar que as operações que exigem maiores consumos são o tingimento e o acabamento. Pelo contrário, a etapa de espremer e a revista, são as que apresentam menores consumos. O processo de produção de um produto de PLA apresenta um custo total de 116,44 €. É importante salientar que na operação do tingimento, não foi considerado os corantes utilizados, tal como no processo de produção do poliéster. No acabamento, mais uma vez, também não se considerou o acabamento utilizado.

No gráfico da Figura 6.5, estão apresentados todos os consumos do processo de tingimento do PLA.

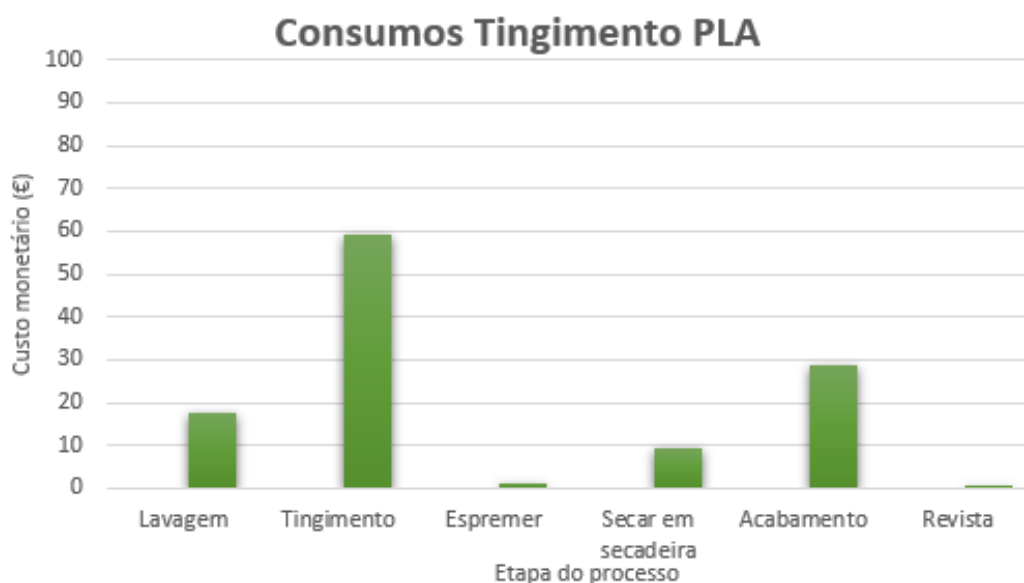


Figura 6.5: Consumos relativos ao processo de produção do PLA.

Tal como se pode observar, a etapa que exige maiores consumos é a do tingimento, seguida do acabamento. Por outro lado, as etapas que não precisam de consumos muito elevados são a revista e espremer.

Quanto às emissões de CO_2 , teve-se em conta apenas o gás natural. As emissões geradas neste processo correspondem a 224,35 kg de CO_2 . Os cálculos para obter este valor de emissões encontram-se no Anexo B.4.

6.7 Comparação dos consumos energéticos dos dois processos produtivos

O processo de produção de um produto de poliéster apresentou um custo de aproximadamente 160,58€. Neste valor não estão incluídos os corantes utilizados nem

os acabamentos.

As emissões de CO_2 geradas neste processo correspondem a 319,42 kg de CO_2 .

Por outro lado, o processo de produção do PLA teve um custo de 116,44€. Mais uma vez, não se considerou os corantes e os acabamentos. Quanto às emissões de CO_2 , obteve-se um valor de 224,35 kg de CO_2 .

Na Tabela 6.8, encontra-se uma comparação relativamente aos consumos necessários para os dois processos, bem como as emissões de CO_2 geradas para cada um.

Tabela 6.8: Comparação dos consumos necessários para cada processo produtivo.

Operação	Processo Poliéster	Processo PLA
Lavagem (€)	17,46	17,46
Tingimento (€)	90,33	59,14
Espremer (€)	1,150	1,150
Secar em râmula/ Secar em secadeira (€)	22,25	9,300
Acabamento (€)	28,93	28,93
Revista (€)	0,46	0,46
Total (€)	160,6	116,4
Emissões de CO_2 (kg de CO_2)	319,4	224,4

Tal como se pode observar através da Tabela 6.8, o processo que exige menores consumos, é o processo de produção do PLA, sendo que as operações com maior diferença de um processo para o outro são o tingimento e a secagem. A secagem no processo de poliéster é realizada em râmula e a do PLA em secadeira, daí a diferença mais acentuada dos consumos.

Em relação às emissões de CO_2 , o processo de produção do PLA também apresenta emissões inferiores ao do poliéster, visto que necessita de menos gás natural no seu processo de produção. A energia elétrica não é contabilizada visto que esta provém de fontes renováveis.

O produto obtido a partir do PLA não apresentou uma boa qualidade tanto de toque como de cor, devido a fatores como temperatura e tempo.

Apesar do custo de produção do produto de PLA ser ligeiramente inferior ao do poliéster, o custo da matéria-prima de PLA é três vezes superior ao do poliéster o que corresponde a uma grande desvantagem.

Assim, é possível afirmar que a produção de um produto de PLA é vantajosa a nível de sustentabilidade e ambiente, uma vez que exige menores consumos tanto

de produtos químicos como energia elétrica, para além de apresentar o fator biodegradabilidade. As emissões de CO_2 são também inferiores comparativamente ao poliéster.

6.8 Alternativas de Fim de Vida

Em Portugal, a reciclagem de produtos têxteis não é um conceito completamente desconhecido, no entanto, a reciclagem de vestuário é apenas pontual. A nível internacional, grandes empresas como Marks&Spencer ou a Wal-Mart já concedem vestuário para reciclar.

Contudo ainda não existem muitas formas viáveis de dar a conhecer ao cliente as diversas maneiras de tratamento de um determinado produto de moda, com o grande objetivo de fechar o ciclo de vida do produto.

6.8.1 Orientação para o fim de vida do produto

Propõe-se a utilização de "etiquetas sustentáveis" em cada peça de roupa sendo estas, informativas e apelativas de modo a tornar esta informação rápida e fácil de alcançar.

Na Figura 6.6, encontram-se dois exemplos de etiquetas sustentáveis, em que estão apresentadas as diferentes quantidades de água, químicos e energia elétrica consumidos para a produção de uma t-shirt, com o objetivo de sensibilizar a população para consumir com mais moderação. Para além disto, encontra-se também um *QR code*, em que o grande objetivo seria implementar uma estratégia de forma a educar a população em relação ao que fazer com as peças de roupa quando já se encontram no seu fim de vida.

Por exemplo, o *QR code*, teria acesso à localização de determinado consumidor e com isso iria indicar o centro de reciclagem ou compostagem mais próximo da sua zona. Poderia indicar, também, determinadas lojas que fizessem recolhas de roupa já com esse propósito.

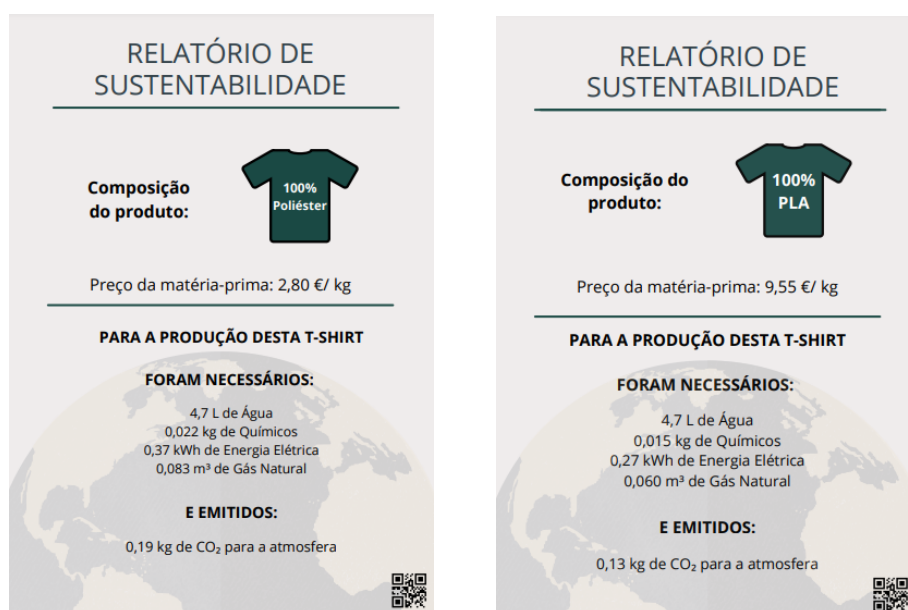


Figura 6.6: Etiquetas de Sustentabilidade para um produto de Poliéster e outro de PLA.

Para se chegar aos valores apresentados na etiqueta, considerou-se que uma t-shirt tem um peso de 190 g.

Assim, pode-se observar que para a produção de uma t-shirt de Poliéster Reciclado foram necessários 4,7 L de água, 0,022 kg de químicos, 0,37 kWh de energia elétrica e 0,083 m³ de gás natural. Foram emitidos cerca de 0,19 kg de CO₂. Por outro lado, para produzir uma t-shirt de PLA, é necessário 4,7 L de água, 0,015 kg de químicos, 0,27 kWh de energia elétrica e 0,060 m³ de gás natural. Foram emitidos cerca de 0,13 kg de CO₂ para a atmosfera.

Posto isto, é possível afirmar que em todo o processo de produção de uma t-shirt de PLA os consumos da transformação da malha no estado cru em produto acabado irão ser iguais ou inferiores quando comparados com o do Poliéster. Apesar do preço da matéria-prima do PLA ser três vezes superior ao do Poliéster Reciclado, os consumos vão ser inferiores, e existe ainda a grande vantagem da sustentabilidade e biodegradação do PLA que o Poliéster Reciclado não apresenta.

Nesta abordagem das etiquetas, apenas se considera a análise do ciclo de vida da fase processual que transforma a fibra no estado cru em produto acabado, não sendo considerada a fase processual desde a matéria-prima até ao estado cru. Para tal, seria necessário fazer um levantamento muito exaustivo do processo de produção do poliéster e do PLA, que está fora do alcance desta dissertação, uma vez que não se encontram publicações que comparem as duas alternativas. No entanto, com base em algumas referências bibliográficas e face ao processo de produção do poliéster e

do PLA, tudo indica que o processo de produção do PLA é mais caro, consome mais água e mais energia, além do tempo de fabrico ser mais longo, o que é característico dos processos biotecnológicos. Assim, tudo indica que será expectável a obtenção de emissões de CO_2 em maior quantidade na produção do PLA. Tal expectativa não prejudica, no entanto, a maior sustentabilidade do PLA devido ao facto do CO_2 emitido pelo seu processo de fabrico ser, na sua grande parte, absorvido pelas plantas que dão origem ao PLA, e por isso renovável, não contribuindo assim para uma real emissão de CO_2 o que pode resultar num balanço positivo a favor do PLA [70], [71], [72].

Com isto, as marcas teriam a oportunidade de fechar o ciclo de vida das peças de roupa, tornando a indústria têxtil mais sustentável.

6.8.2 Aplicação da Economia Circular

Conforme já referido no Capítulo 4, a importância da economia circular tem vindo a crescer cada vez mais no sentido de contribuir de forma significativa para a sustentabilidade e para a minimização do impacto ambiental das indústrias em geral. Nenhuma metodologia prática é conhecida no sentido de reciclar vestuário de poliéster ou PLA de forma a obter a fibra no estado cru para a utilização da própria indústria têxtil. No entanto, sendo a avaliação da possibilidade de praticar a economia circular na indústria têxtil um dos objetivos desta tese, selecionou-se entre as várias possibilidades de reciclagem, a reciclagem mecânica como uma abordagem passível de ser estudada o que, dada a complexidade do trabalho, não fez parte desta dissertação.

Contudo, entendeu-se deixar uma proposta de caminho para um estudo de desenvolvimento de processo de transformação de vestuário de base poliéster ou PLA, em fim de vida, na fibra que lhe deu origem no seu estado cru para posterior reutilização na indústria têxtil. Este processo tem por base o estado da arte apresentado no Capítulo 3 e alguma bibliografia complementar [73], [74], além de considerações próprias quanto à complexidade do problema e não encontradas na bibliografia.

Um problema a considerar neste estudo é o facto de o vestuário em fim de vida apresentar uma gama de cores muito variada, além de componentes introduzidos no processo de acabamento para conferir certas propriedades ao produto. Aqui pode abordar-se a resolução deste problema através de três alternativas: pré-tratamento no sentido de eliminar alguns contaminantes de acabamento e descolorar a roupa na generalidade, obtendo uma fibra no estado cru de cor neutra, pré-tratamento no sentido de eliminar alguns contaminantes de acabamento e tingir a fibra numa cor base

apropriada para a produção de cores escuras, e fazer seleção do vestuário em fim de linha por gama de cores para posterior pré-tratamento no sentido de tingir a fibra em diferentes cores. Face a estas três alternativas, decidiu-se optar pela primeira alternativa na proposta de processo de reciclagem que passa a ser descrita na Figura 6.7 e que tem por base o pré-tratamento selecionado e a reciclagem mecânica.

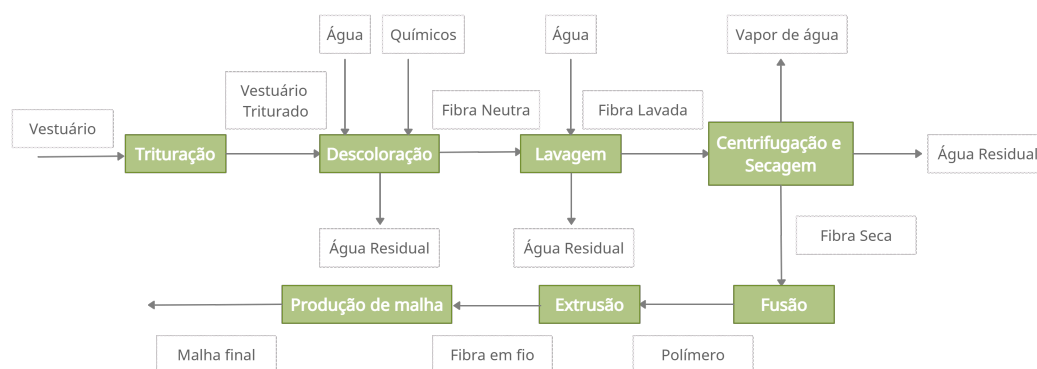


Figura 6.7: Processo do pré-tratamento e reciclagem mecânica.

Nesta proposta de processo, as várias etapas do processo têm a seguinte finalidade:

1. **Trituração:** trituração do material para reduzir o seu tamanho e tornar mais fácil as etapas seguintes;
2. **Descoloração:** eliminação da cor e de contaminantes efetuada em meio aquoso;
3. **Lavagem:** lavagem para eliminação de resíduos contaminantes e corante ainda existentes;
4. **Centrifugação e secagem:** para eliminação da água preparando a fibra para a fusão do polímero posterior;
5. **Fusão do polímero:** fusão térmica do polímero;
6. **Extrusão:** produção de fibra no estado cru em forma de fio;
7. **Produção da malha:** a partir da fibra no estado cru e na forma de fio, produzir a malha no estado cru pelo processo convencional pronta a ser reutilizada pela indústria têxtil.

A apresentação desta proposta pressupõe uma série de considerações base extremamente importantes, quanto ao controlo do processo e também do produto final. Será necessário estabelecer através de estudos adequados as condições de operação

de cada uma das etapas, nomeadamente temperaturas de operação, pH do processo de descoloração, agentes químicos a utilizar no processo de descoloração, entre outras a definir. Por outro lado, o produto final deverá ser comparado com o produto original, isto é, com a fibra que lhe deu origem no seu estado cru, de forma a validar a sua utilização quanto a resistências físico-mecânicas e outras propriedades que se entenda importantes para avaliar o seu reflexo no produto final, pois é expectável que o pré-tratamento e a reciclagem mecânica possam ter algum efeito negativo, nomeadamente nas resistências físico-mecânicas pelo efeito que terão no tamanho molecular do polímero.

Fica assim proposto um trabalho de desenvolvimento e investigação no sentido de promover a economia circular, mas que seria de todo impossível de ser realizado nesta tese.

No caso do estudo ser efetuado e conduzir a resultados positivos, a empresa não terá capacidade para o colocar em prática, uma vez que não apresenta o equipamento necessário. Tal inconveniente pode ser ultrapassado através de parcerias com outras empresas que tenham a capacidade de o fazer.

Capítulo 7

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Os grandes desafios da sociedade, atualmente, incluem os problemas ambientais, poluição, questões de gestão de resíduos de plástico e exigências dos consumidores em opções de matérias-primas amigáveis para o ambiente.

Acredita-se que o PLA poderá ser uma alternativa ideal para os polímeros de base fóssil, devido à sua abrangência e à sua capacidade de biodegradação.

O objetivo desta dissertação passou pela Análise do Ciclo de Vida do PLA e do poliéster, sendo que para isso, foi necessário fazer o levantamento de todos os consumos envolvidos na produção de uma malha das duas matérias-primas.

O processo de poliéster apresentou um custo de 160,6 €, com emissões de CO_2 de cerca de 319,4 kg de CO_2 . Por outro lado, o processo de PLA apresentou um custo de 116,4 €, sendo que as emissões apresentaram um valor de 224,4 kg de CO_2 . Posto isto, pode-se concluir que o processo de produção de PLA apresenta um custo inferior ao de poliéster, bem como emissões de carbono, sendo uma vantagem significativa para a crescente utilização de PLA.

Apesar do preço da matéria-prima do PLA ser superior à do poliéster, existem diversas vantagens que compensam este fator, tais como o facto de ser uma matéria-prima com base renovável, ser biodegradável e apresentar consumos inferiores em

relação ao processo do poliéster.

Foram realizados diversos tingimentos, tanto a nível laboratorial como industrial. Com estes tingimentos foi possível concluir que o PLA é uma fibra muito sensível e não reage bem ao tingimento a preto, sendo que é necessário uma investigação mais aprofundada sobre este assunto. Por outro lado, no tingimento a roxo a cor obtida foi de encontro ao expectável, contudo, tanto no tingimento a roxo como a preto o toque da fibra foi áspero, o que não é o pretendido.

Após a realização dos tingimentos, foi feito um controlo de qualidade, onde se mediu o pH das amostras tingidas, a diferença de cor e a respetiva gramagem.

Posto isto, fica como sugestão para trabalhos futuros, tentar melhorar dois aspetos, o tingimento do PLA a preto e o seu respetivo toque, de modo a que este possa ser utilizado na indústria têxtil como futura substituição do poliéster.

Salienta-se ainda, como sugestão de trabalho futuro, um estudo da reciclagem de vestuário em fim de vida que se propõe para a produção da fibra original que lhe deu origem, contribuindo assim para uma economia circular e conseqüente reflexo positivo no aumento da sustentabilidade ambiental do processo industrial, caso seja viável tal reciclagem.

Bibliografia

- [1] *Sustainability*. URL: <https://www.adalberto.pt/sustainability> (acedido em 19/04/2021).
- [2] *Política de Gestão*. URL: https://www.adalberto.pt/uploads/Adalberto/3Company/Quality/POLITICAGESTA017012019_new_.pdf (acedido em 19/04/2021).
- [3] Paulo Nunes de Almeida AEP- Associação Empresarial de Portugal. «Manual de Produção mais Limpa da Indústria Têxtil». Em: (2011).
- [4] Fernando Henrique Lermen Vander Luiz da Silva. «Análise da Aplicabilidade de Modelos de Referência do PDP nas Empresas». Em: (2015).
- [5] CITEVE. «Indústria Têxtil e do Vestuário, Roadmap para a Inovação 2012-2020.» Em: (2012).
- [6] Almut Reichel e Lars Fogh Mortensen. *Environmental Indicator Report, Environmental Impacts of Production- Consumption Systems in Europe*. European Environment Agency, 2014.
- [7] Confederação Nacional da Indústria Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. «Têxtil e confecção: Inovar, Desenvolver e Sustentar». Em: (2012).
- [8] Direção Geral das Atividades Económicas. «Indústria Têxtil e Vestuário- Síntese». Em: (2018).
- [9] Saurabh Vaidya e Prashant Ambad. «Industry 4.0 – A Glimpse». Em: (2018).
- [10] Soutinho HFDC. «Design funcional de vestuário interior». Em: (2006).
- [11] Anja Schaefer e Brian Harvey. «Stage models of corporate 'greening': a critical evaluation.» Em: (2018).
- [12] C. Santos e A. Mendes. «Produção de peças biodegradáveis de parede fina por injeção.» Em: (2014).
- [13] Observatório Têxtil do CENESTAP. «Mercados Mundiais para Têxteis Técnicos.» Em: (2014).

- [14] Ana Cristina Rodrigues e Érico Rial Pinto. «Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confeções e a questão da inovação.» Em: (2015).
- [15] U.S. Environmental Protection Agency. *Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry*. 2012.
- [16] Brsail Indústria M. «A cadeia produtiva têxtil.» Em: (2013).
- [17] Subramanian Senthilkannan Muthu. *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Woodhead Publishing in association with the Textile Institute, 2015.
- [18] Gislaine de Souza Pereira. «Materiais e Processos Têxteis.» Em: (2009).
- [19] Alhayat Getu. *Weaving Technology- Teaching Material on Woven Fabric Manufacture*. LAP- Lambert Academic Publishing, 2019.
- [20] Gislaine de Souza Pereira. «Introdução à Tecnologia Têxtil.» Em: (2011).
- [21] Universidade do Minho - Cátia Marlene Leite Pinto. «Melhoria das Propriedades do Poliéster através da Funcionalização com Poli (álcool de vinilo)». Em: (2019).
- [22] Camila Nilma de Lima. «Otimização do processo de tingimento da fibra de poliéster utilizando cumarina como carrier.» Em: (2020).
- [23] FEUP- Maria Jesus da Silva Carvalho. «Têxteis do novo milénio- Têxteis técnicos e inteligentes». Em: (2004).
- [24] Universidade do Minho- Maria Isabel Castro da Costa Alves. «Modificação química do poliéster para obtenção de efeitos “soil-release”». Em: (2016).
- [25] Amisha Kumari e Neethu U. «Chemistry project- Polyester.» Em: (2017).
- [26] Anna Raffaella de Matos Costa. «Blendas e os seus compósitos com babaçu: efeito da composição e das condições de processamento.» Em: (2019).
- [27] Antex. «Yarnaway: Biodegradation.» Em: (2020).
- [28] Daiane Schaeffer. «Obtenção e caracterização de biopolímeros a partir de fécula de mandioca e amido de milho.» Em: (2020).
- [29] Paul McKeown and Matthew D. Jones. «The Chemical Recycling of PLA: A Review». Em: (2020).
- [30] Valéria delgado Bastos. «Biopolímeros e polímeros de matérias-primas renováveis alternativos aos petroquímios.» Em: (2007).

- [31] Vanusca Dalosto Jahno. «Síntese e caracterização do Poli (L-Ácido Láctico) para uso como biomaterial.» Em: (2005).
- [32] Ana Cláudia Medeiros de Carvalho. «Síntese e caracterização do Poli (L-Ácido Láctico) para potencial uso em sistemas de liberação controlada de fármacos.» Em: (2013).
- [33] Free Polymer Information Source. *Polymer Properties Database*. URL: <https://polymerdatabase.com/Films/PLA%20Films.html> (acedido em 26/05/2021).
- [34] Sérgio Ambrósio Sangarote. «Estudo da plastificação de poli(ácido láctico) via extrusão reativa utilizando álcoois ramificados e oligómeros de ácido láctico.» Em: (2016).
- [35] K. Madhavan Nampoothiri e Nimisha Rajendran Nair. «An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research.» Em: (2010).
- [36] *PLA-Filamentgarne: Innovativ nachhaltig - Trevira*. URL: <https://www.trevira.de/filamente/pla-garne> (acedido em 04/06/2021).
- [37] Subramanian Senthilkannan Muthu e Miguel Angel Gardetti. *Sustainable Fibres for Fashion Industry*. Springer, 2016.
- [38] E. Castro-Aguirren e F. Iñiguez-Franco. «Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life.» Em: (2016).
- [39] P. Saini e M. Arora. «Poly(lactic acid) blends in biomedical applications.» Em: (2016).
- [40] Fausto Gironi e Vincenzo Piemonte. «Life Cycle Assessment of Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Bottles for Drinking Water.» Em: (2010).
- [41] Gabriela Jobim da Silva e Nathália Raphaeli. «Desenvolvimento sustentável na indústria têxtil: Estudo de propriedades e características de malhas produzidas com fibras biodegradáveis.» Em: (2006).
- [42] Letícia P. Ferreira e Andrei N. Moreira. «Preparo de Nanocompósitos de Poli(Succinato de Butileno) (PBS) e Argila Motmorilonita Organofílica via Polimerização In Situ.» Em: (2014).
- [43] Erini Adamopoulou. «Poly(butylene succinate): A promising Biopolymer.» Em: (2012).

- [44] Flávio Renato. «Estudo das condições de processamentos e caracterização da matéria-prima para a produção de um biocompósito de matriz de poli(succinato de butileno) com reforço de celulose branqueada.» Em: (2016).
- [45] Rosana Caetano. «Síntese e poli(Succinato de Butileno) (PBS) para a imobilização de ureia na biodegradação de petróleo em sistemas aquáticos artificiais.» Em: (2018).
- [46] Anna Martins. «Avaliação da biodegradação do poli(succinato de butileno) em solo de compostagem.» Em: (2016).
- [47] Parameswaran Shaiju e Benamor-Bois Dorian. «Biodegradation of Poly (Butylene Succinate) (PBS)/Stearate Modified Magnesium-Aluminium Layered Double Hydroxide Composites under Marine Conditions Prepared via Melt Compounding.» Em: (2020).
- [48] Mokrzycki W.S. e Tatol M. «Color difference Delta E- A survey». Em: (2012).
- [49] Bárbara Gama. «Estudo das características físico-químicas de fibras têxteis vegetais de espécies de Malvaceae.» Em: (2014).
- [50] Ellen Macarthur Foundation. «Como a economia circular ajuda a enfrentar as mudanças climáticas.» Em: (2019).
- [51] Margarida Quinta e Isilda Monteiro. «Urjulândia a circular: Economia Circular». Em: (2017).
- [52] Diogo Figueiredo. FEUP-. «Barreiras à implementação da economia circular: Uma revisão da Literatura.» Em: (2019).
- [53] Gabriela Delgado e José António. «Análise de ciclo de vida de sacos plásticos produzidos por reciclagem: Estudo de casos.» Em: (2007).
- [54] Alessandro Singliticoa e Jamie Goggins. «The role of life cycle assessment in the sustainable transition to a decarbonised gas network through green gas production.» Em: (2019).
- [55] Jayati Trivedi e Mounika Aila. «Algae based biorefinery—How to make sense?» Em: (2015).
- [56] Freddy R. Beltrán e Marina P. Arrieta. «Evaluation of the Technical Viability of Distributed Mechanical Recycling of PLA 3D Printing Wastes». Em: (2021).
- [57] Seksan Papong e Pomthong Malakul. «Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective». Em: (2014).

- [58] Stefanie Teixeira e Filipa Miranda. «Towards Controlled Degradation of Poly(lactic) Acid in Technical Applications». Em: *Journal of Carbon Research* (2021).
- [59] Andreas Detzel e Martina Krüger. «Life Cycle Assessment of Polylactide (PLA) -A comparison of food packaging made from NatureWorks PLA and alternative materials». Em: (2006).
- [60] Venkat Aryan e Daniel Maga. «Valorisation of polylactic acid (PLA) waste: A comparative life cycle assessment of various solvent-based chemical recycling technologies». Em: (2021).
- [61] Marina Andrade. «Estudo da avaliação de ciclo de vida do PLA: Comparação entre a reciclagem química, mecânica e compostagem.» Em: (2015).
- [62] Magdalena Daria Vaverková. «Landfill Impacts on the Environment—Review.» Em: (2019).
- [63] Tobias P. Haider e Carolin Vçlker. «Plastics of the Future? The Impact of Biodegradable Polymers on the Environment and on Society». Em: (2019).
- [64] S. Mehdi Emadian e Turgut T. Onay. «Biodegradation of bioplastics in natural environments.» Em: (2017).
- [65] Pasqua L'Abbate e Michele Dassisti. «Environmental analysis of polyester fabric for ticking.» Em: (2018).
- [66] Eleandro B. Pinho e Helson M. da Costa. «Análise Técnica do Uso de Resíduos de Poliéster na Indústria Têxtil.» Em: (2019).
- [67] Misael Carapinha. «Reciclagem de Plásticos: Identificação de contaminantes e estratégias de valorização dos resíduos industriais.» Em: (2008).
- [68] Maria Oliveira. «Gestão de resíduos plásticos pós- consumo: Perspetivas para a reciclagem.» Em: (2012).
- [69] Vitor Pessoa. «Reciclagem e reutilização de materias poliméricos plásticos». Em: (2018).
- [70] Marius Murariu e Philippe Dubois. «PLA composites: From production to properties». Em: (2016).
- [71] Tiago Lima de Albuquerque e José Edvan Marques Júnior. «Polylactic acid production from biotechnological routes: A review». Em: (2021).
- [72] Daniel Maga e Markus Hiebel. «Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid». Em: (2019).

- [73] F.R. Beltrán e V. Lorenzo. «Effect of simulated mechanical recycling processes on the structure and properties of poly(lactic acid)». Em: (2018).
- [74] Daniel Gere e Tibor Czigany. «Recycling of Mixed Poly(Ethylene-terephthalate) and Poly(Lactic Acid)». Em: (2019).

Anexo A

Consumos para o processo produtivo do Poliéster 100% Reciclado

A.1 Consumos de água

Ao longo do Anexo A, utilizou-se como exemplo de cálculo o processo da lavagem.

Para o processo produtivo de Poliéster 100% Reciclado, utilizaram-se cerca de $8 m^3$ de água. Sendo que $2,6 m^3$ foram utilizados no processo da lavagem, $5,2 m^3$ no processo do tingimento e $0,2 m^3$ no acabamento.

Considerando o preço da água de $1 €/m^3$, valor fornecido pela empresa, resulta um preço de $2,6 €$ para a lavagem, $5,2 €$ para o tingimento e $0,2 €$ para o acabamento.

A.2 Consumos químicos

Relativamente aos consumos químicos, utilizaram-se $5,210 kg$ na etapa da lavagem e os produtos utilizados tiveram um custo de $1,89 €$. Assim:

$$5,210 kg \times 1,89 € = 9,85 €$$

Fez-se o mesmo cálculo para as outras etapas do processo, tendo em conta os diferentes produtos químicos utilizados.

A.3 Consumos energéticos

Como referido anteriormente, os consumos energéticos consideram-se divididos em duas componentes, energia elétrica e gás natural.

- **Energia Elétrica:**

Foi considerado que a energia elétrica apresenta um custo de 0,1 €/kWh, valor fornecido pela empresa. Relativamente à etapa da lavagem foram necessários 17,5 kWh de energia, correspondendo a 1,75 €, ou seja:

$$17,5 kWh \times 0,1 \text{ €/kWh} = 1,75 \text{ €}$$

Mais uma vez, seguiu-se a mesma lógica para as etapas seguintes, dependendo da energia necessária.

- **Gás Natural:**

Relativamente ao gás natural, considerou-se um preço de 0,23 €/m³, valor fornecido pela empresa. Na lavagem, foram necessários 14,17 m³ de gás natural, logo:

$$14,17 m^3 \times 0,23 \text{ €/m}^3 = 3,26 \text{ €}$$

Utilizou-se o mesmo método para chegar aos valores da Tabela 5.2.

A.4 Emissões de CO₂

Para fazer o cálculo das emissões de CO₂ considerou-se o gás natural. Para isso, somou-se os consumos totais de gás natural, obtendo-se 142,59 m³.

Considerou-se 1 m³ = 11,79 kWh, logo:

$$142,59 m^3 \times 11,79 kWh = 1681,14 kWh$$

Sabendo que 1 kWh corresponde a uma emissão de 190 g de CO₂, valor dado pela empresa:

$$1681,14 kWh \times 0,190 kg CO_2 = 319,42 kg$$

Assim, no processo de produção do Poliéster 100% Reciclado, existiu uma emissão de 319,42 kg de CO_2 .

Anexo B

Consumos para o processo produtivo do PLA

B.1 Consumos de água

Ao longo do Anexo B, utilizou-se como exemplo de cálculo o processo da lavagem. Para o processo produtivo do PLA, utilizaram-se cerca de $8 m^3$ de água. Sendo que $2,6 m^3$ foram utilizados no processo da lavagem, $5,2 m^3$ no processo do tingimento e $0,2 m^3$ no acabamento. Considerando o preço da água de $1€/m^3$, valor dado pela empresa, resulta um preço de 2,6 € para a lavagem, 5,2 € para o tingimento e 0,2 € para o acabamento.

B.2 Consumos químicos

Relativamente aos consumos químicos, utilizaram-se 5,210 kg na etapa da lavagem. Na lavagem, os produtos utilizados tiveram um custo de 1,89 €. Assim:

$$5,21 \text{ kg} \times 1,89 \text{ €} = 9,85 \text{ €}$$

Fez-se o mesmo cálculo para as outras etapas do processo, tendo em conta os diferentes produtos químicos utilizados.

Na operação do tingimento não se considerou os corantes utilizados. Na etapa do acabamento, também não se teve em conta o acabamento utilizado.

B.3 Consumos energéticos

Tal como aconteceu com o processo de poliéster, os consumos energéticos encontram-se divididos em energia elétrica e gás natural.

- **Energia Elétrica:** O custo da energia elétrica foi considerado o mesmo, 0,1 €/kWh. Relativamente à etapa da lavagem, foram necessários 17,5 kWh de energia, correspondendo a 1,75 €, ou seja:

$$17,5 kWh \times 0,1 \text{ €/kWh} = 1,75 \text{ €}$$

Mais uma vez, seguiu-se a mesma lógica para as etapas seguintes, dependendo da energia necessária.

- **Gás Natural:** Relativamente ao gás natural, considerou-se um preço de 0,23 €/m³, valor indicado pela empresa. Na lavagem, foram necessários 14,17 m³ de gás natural, logo:

$$14,17 m^3 \times 0,23 \text{ €/m}^3 = 3,26 \text{ €}$$

Utilizou-se o mesmo método para chegar aos valores da Tabela 5.4.

B.4 Emissões de CO₂

Para fazer o cálculo das emissões de CO₂ considerou-se o gás natural. Para isso, somou-se os consumos totais de gás natural, obtendo-se 100,15 m³.

Considerou-se 1 m³ = 11,79 kWh, logo:

$$100,15 m^3 \times 11,79 kWh = 1180,77 kWh$$

Sabendo que 1 kWh corresponde a uma emissão de 190 g de CO₂, valor dado pela empresa:

$$1180,77 kWh \times 0,190 kg CO_2 = 224,35 kg$$

Assim, no processo de produção do PLA, existiu uma emissão de 224,35 kg de CO_2 .