



M 2023

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS TÊXTEIS NA PRODUÇÃO DE FIBRAS E FIOS RECICLADOS

INÊS ABILHEIRA COSTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado em Engenharia Química

Valorização de Resíduos Têxteis na Produção de Fibras e Fios Reciclados

Dissertação de Mestrado

de

Inês Abilheira Costa

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

CITEVE - Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e Vestuário de Portugal



Orientador na FEUP: Prof. Manuel Fernando Pereira

Coordenadora no CITEVE: Dr.^a Catarina Guise



agosto de 2023

“Live life for the moment cause everything else is uncertain!”

- Louis Tomlinson

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora no CITEVE, Dr.^a Catarina Guise, por todo o apoio, acompanhamento, por todo o conhecimento transmitido e, acima de tudo, disponibilidade ao longo da realização desta dissertação. Ao meu orientador académico, Prof. Manuel Fernando Pereira, pela disponibilidade para esclarecer qualquer dúvida que surgisse.

Gostaria, ainda, de agradecer a todos os colaboradores do CITEVE que, de forma direta ou indireta, estiveram envolvidos ou contribuíram para a realização da minha dissertação, nomeadamente à Cristina, ao Eng. Filipe e ao João.

À minha família pelo apoio incondicional, por me aturarem mesmo nos piores dias e me fazerem acreditar que sou capaz de tudo aquilo que quiser.

Aos meus amigos, principalmente às minhas pessoas, por todo o apoio ao longo dos últimos 5 meses, por acreditarem em mim, não me deixarem desistir e por me conseguirem sempre pôr um sorriso na cara mesmo quando a vontade é pouca.

A todos aqueles que, de uma forma ou outra, estiveram na minha vida eventualmente ao longo destes 6 anos, que contribuíram para me tornar na pessoa que sou hoje e tornaram esta etapa inesquecível.

Por fim, mas, sem dúvida, não menos importante, à minha melhor amiga, a minha maior inspiração, a pessoa que me ajuda a encontrar as portas quando eu só bato em paredes e que me torna uma pessoa melhor todos os dias, sem ela nada disto teria sido possível.

Uma Palavra de Apeço!

Esta Dissertação de Mestrado foi realizada no âmbito do Projeto Integrado be@t - Bioeconomia Têxtil, para Reforço da Bioeconomia Nacional, financiado pelo Fundo Ambiental através da Componente 12 - Promoção da Bioeconomia Sustentável (Investimento TC-C12-i01 - Bioeconomia Sustentável N.º 02/C12-i01/202), dos fundos europeus atribuídos a Portugal pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), no âmbito do Mecanismo de Recuperação e Resiliência da União Europeia (UE), enquadrado no Next Generation UE, para o período de 2021-2026.

Resumo

A indústria têxtil é um dos setores económicos mais importantes na Europa, contudo encontra-se associada a 4 a 6 % da pegada ecológica global. Assim, é necessário e urgente reduzir significativamente os impactes ambientais e tornar este setor mais sustentável. O crescimento acelerado da população mundial contribuiu para um aumento considerável da quantidade de resíduos têxteis. Estima-se que, anualmente, cada europeu produza cerca de 15 kg de resíduos têxteis, sendo que aproximadamente 65 % são desperdiçados em aterros. A reciclagem têxtil é uma alternativa sustentável para estes resíduos, promovendo não só a economia circular no setor, mas também a valorização dos resíduos têxteis. Em 2021, a quota de produção de fibras recicladas foi de cerca de 9 %, contudo apenas menos de 1 % resultou da reciclagem de têxteis pré ou pós-consumidor. Assim, é fundamental o estudo e desenvolvimento da reciclagem têxtil, tornando-a mais rentável e apelativa para uma maior implementação na indústria têxtil.

Esta dissertação foca-se na produção e caracterização de fios com misturas de fibras de algodão recicladas e fibras virgem de algodão e de liocel, com diferentes composições e teores de fibras recicladas, utilizando-se a reciclagem mecânica de malhas e tecidos de resíduos têxteis para obter as fibras recicladas e a fição convencional de anel para a produção dos fios.

Concluiu-se que o processo de reciclagem mecânica diminui significativamente o tamanho e aumenta a dispersão dos comprimento das fibras têxteis. Observa-se uma presença notável de fibras curtas e, ainda, alguns fios e retalhos das estruturas têxteis nas ramas de fibras recicladas, que afetam a qualidade dos fios produzidos.

Além disso, a incorporação de fibras recicladas afeta consideravelmente a qualidade dos fios, devido ao elevado número de fibras curtas que influenciam a eficiência do processo de fição e as propriedades do fio. Quanto maior o teor de fibras recicladas, mais complicada a fição de fios mais finos. Verifica-se que o aumento do teor de fibras recicladas afeta as propriedades mecânicas do fio, diminuindo a sua resistência. É, ainda, de salientar que as propriedades do fio são afetadas não só pelas características das fibras, mas também pelo processo de produção. Assim, a utilização da fição de anel e a produção numa linha piloto podem influenciar a qualidade dos fios produzidos.

Adicionalmente, a utilização de fibras virgem de liocel em vez de algodão permite a produção de fios com fibras recicladas com títulos superiores e com uma maior resistência à rotura.

Por fim, a comparação com os parâmetros da *USTER® Statistics 2023* para um fio 100 % algodão, permitiu concluir que a incorporação de fibras recicladas diminui a resistência e aumenta significativamente a irregularidade e as imperfeições dos fios produzidos.

Em suma, esta dissertação permite avaliar o efeito da incorporação de fibras de algodão recicladas de resíduos têxteis nas propriedades de fios produzidos pela fição de anel.

Palavras-Chave: Reciclagem Mecânica, Resíduos Têxteis, Fiação de Anel, Algodão, Fibras Têxteis

Abstract

The textile industry is one of the most important economic sectors in Europe, yet it is associated with 4 to 6 % of the global ecological footprint. Therefore, it is necessary and urgent to reduce drastically its environmental impacts and make this sector more sustainable. The rapid growth of the world population has contributed to a significant increase in the amount of textile waste. It is estimated that each European produces annually about 15 kg of textile waste, with about 65 % being wasted in landfills. Textile recycling is a sustainable alternative for such waste, promoting not only the circular economy in the sector, but also the recovery and valorization of textile waste. In 2021, the production of recycled fiber's share was about 9 %, yet only less than 1 % resulted from recycling of pre- or post-consumer textiles. Thus, the study and development of textile recycling is crucial, in order to make it more profitable and appealing for further implementation in the textile industry.

This thesis is aimed at the production and characterization of yarns with blends of recycled cotton fibers and cotton and lyocell virgin fibers, with different compositions and contents of recycled fibers. The mechanical recycling of knit and fabric textile waste was used to obtain the recycled fibers and the conventional ring spinning to produce the yarns.

It was concluded that the mechanical recycling process significantly decreases the size of the textile fibers and increases the dispersion of its lengths. A remarkable presence of short fibers and also some yarns and pieces of the textile structures are observed in the recycled fiber mats, which affect the quality of the produced yarns.

In addition, the incorporation of recycled fibers affects substantially the yarn quality, due to the high number of short fibers that influence the efficiency of the spinning process and the yarn properties. The higher the recycled fiber content, the more complex the spinning of finer yarns. Increasing the recycled fiber content is found to affect the mechanical properties of the yarn by decreasing its strength. It should also be noted that yarn properties are affected not only by fiber characteristics but also by the production process. Thus, the use of ring spinning and production on a pilot line can influence the quality of the yarn produced.

Additionally, the use of virgin lyocell fibers instead of cotton allows the production of yarns with recycled fibers with higher counts and a higher tensile strength.

Finally, the comparison with the *USTER® Statistics 2023* parameters for a 100% cotton yarn, enabled the conclusion that the recycled fibers' incorporation decreases the strength and significantly increases the irregularity and imperfections of the produced yarns.

In summary, this dissertation allows to evaluate the effect of the incorporation of recycled cotton fibers from textile waste on the properties of yarns produced by ring spinning.

Keywords: Mechanical Recycling, Textile Waste, Ring Spinning, Cotton, Textile Fibres

Declaração

Eu, Inês Abilheira Costa, declaro, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Porto, 5 de agosto de 2023

(Inês Abilheira Costa)

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	2
1.3	Contributos da Autora para o Trabalho	2
1.4	Organização da Dissertação	2
2	Contexto e Estado da Arte	5
2.1	Indústria Têxtil	5
2.1.1	Etapas da Produção de um Produto Têxtil	7
2.2	Fibras Têxteis.....	7
2.2.1	Definição e Classificação de Fibras Têxteis	7
2.2.2	Contextualização Histórica	9
2.2.3	Aplicações das Fibras Têxteis	9
2.3	Processo de Produção de Fios	10
2.3.1	Definição e Tipos de Fios	10
2.3.2	Produção de Fios Cardados	11
2.4	Reciclagem Têxtil	13
2.4.1	Reciclagem Mecânica.....	15
2.4.2	Fibras Recicladadas no Mercado	16
3	Materiais e Métodos	19
3.1	Reciclagem Mecânica.....	19
3.2	Processo de Produção dos Fios.....	21
3.2.1	Fios com Fibras Recicladadas Provenientes das Malhas	24
3.2.2	Fios com Fibras Recicladadas Provenientes dos Tecidos	24
3.3	Ensaio de Caracterização.....	25
3.4	Base de Dados <i>USTER® Statistics 2023</i>	28
4	Resultados e Discussão.....	29
4.1	Resíduos Têxteis de Malhas 100 % Algodão	29

4.2	Fibras de Algodão Recicladas de Malhas	30
4.3	Resíduos Têxteis de Tecidos 100 % Algodão	32
4.4	Fibras de Algodão Recicladas de Tecidos.....	34
4.5	Caracterização dos Fios.....	35
4.5.1	Fios com Fibras Recicladas Provenientes das Malhas	35
4.5.2	Fios com Fibras Recicladas Provenientes dos Tecidos	38
4.5.3	Comparação com <i>USTER® Statistics 2023</i>	39
5	Conclusões	43
6	Avaliação do Trabalho Realizado	45
6.1	Objetivos Cumpridos	45
6.2	Limitações e Trabalhos Futuros.....	45
6.3	Apreciação Final	45
7	Referências	47
Apêndice A	Determinação do Número de Fitas para a 2ª Passagem no Laminador	51

Lista de Figuras

Figura 1. Evolução da produção mundial de fibras têxteis [Adaptada de (Textile Exchange, 2022)]......	5
Figura 2. Produção global de fibras têxteis em 2021 [Adaptada de (Textile Exchange, 2022)].	6
Figura 3. Fluxograma da cadeia produtiva de um produto têxtil [Adaptada de (Shuvo, 2020)]......	7
Figura 4. Classificação das fibras têxteis (Shuvo, 2020; Textile Exchange, 2022)......	8
Figura 5. Representação esquemática do processo de produção de fios cardados [Adaptada de (Alagirusamy & Das, 2015)]......	11
Figura 6. Equipamentos da reciclagem mecânica: a) máquina de corte e b) desfibradora.	19
Figura 7. Representação esquemática do processo de reciclagem mecânica.	20
Figura 8. Etapas do processo de produção dos fios: a) mistura de fibras recicladas com fibras virgem, b) cardação das fibras, c) produção da fita cardada, d) 1ª passagem no laminador, e) 2ª passagem no laminador, f) produção da mecha, g) contínuo de fiação de anel e h) fios obtidos.	21
Figura 9. Fotografias dos equipamentos utilizados na vaporização dos fios: banho termostático, à esquerda, e estufa ventilada, à direita.	23
Figura 10. Fotografia do processo de bobinagem dos fios.	23
Figura 11. Fotografias dos equipamentos utilizados na determinação do título dos fios das malhas. .	26
Figura 12. Fotografia do equipamento da Zweigle utilizado para os ensaios de torção.	26
Figura 13. Fotografias dos equipamentos utilizados na determinação da gramagem da malha.	26
Figura 14. Fotografia de ensaio de determinação de comprimento por medição fibra a fibra.	27
Figura 15. Jardeira utilizada nos ensaios de determinação do título dos fios.	27
Figura 16. Fotografias do equipamento STATIMAT M, à esquerda, e do USTER® Tester 3, à direita. ..	28
Figura 17. Distribuição de comprimentos das fibras da malha branca 100 % algodão.	29
Figura 18. Distribuição de comprimentos das fibras da malha cinza 100 % algodão.	30
Figura 19. Distribuição de comprimentos das fibras recicladas provenientes das malhas.	30
Figura 20. Comparação das distribuições de comprimento das fibras das malhas com as fibras recicladas obtidas e as fibras de algodão virgem.	31
Figura 21. Fotografia dos três tecidos 100 % algodão.	32
Figura 22. Distribuição de comprimentos das fibras do tecido A.	33
Figura 23. Distribuição de comprimentos das fibras do tecido B.	33
Figura 24. Distribuição de comprimentos das fibras do tecido C.	33
Figura 25. Distribuição de comprimentos das fibras recicladas provenientes dos tecidos.	34

Figura 26. *Comparação das distribuições de comprimento das fibras dos tecidos com as fibras recicladas obtidas e as fibras de algodão virgem.* 34

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1. Parâmetros operacionais utilizados na desfibradora.</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2. Parâmetros associados à produção dos 4 fios com fibras recicladas de algodão.</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 3. Parâmetros utilizados no contínuo de fiação para cada um dos fios produzidos.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 4. Resultados obtidos na caracterização dos desperdícios têxteis de malhas 100 % algodão. ...</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 5. Resultados obtidos na caracterização dos tecidos 100 % algodão.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 6. Resultados obtidos na determinação do título dos fios.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 7. Resultados obtidos nos ensaios de resistência dos fios à rotura.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 8. Resultados obtidos na análise de regularidade e de imperfeições dos fios.</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 9. Resultados da determinação do título e dos ensaios de resistência dos fios à rotura.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 10. Resultados obtidos na análise de regularidade e imperfeições do Fio 2.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 11. Parâmetros de caracterização de fios obtidos na base de dados USTER® Statistics 2023... </i>	<i>40</i>

Notação

$C.V.m.$ Coeficiente De Variação De Massa

E Estiragem

k Coeficiente De Torção

T Torção

U_m Regularidade Média

voltas·m⁻¹

Lista de Siglas

ASTM *American Society for Testing and Materials*

CITEVE Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e de Vestuário

EN *European Standard*

ISO *International Organization for Standardization*

NP Norma Portuguesa

TNT Tecidos Não Tecido

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

O aumento da população mundial, a crescente urbanização e as exigências cada vez mais elevadas relativamente à qualidade dos produtos têxteis são alguns dos fatores que contribuem para o crescimento do setor têxtil, aumentando consideravelmente a produção e o consumo de têxteis e, consequentemente, a quantidade de resíduos dos mesmos (Grand View Research, 2023; Ichim & Sava, 2022).

Além disso, os elevados consumos energéticos e de recursos, a utilização intensiva de produtos químicos, problemas éticos e de resíduos são os principais problemas associados à indústria têxtil e de vestuário que tornam necessária a implementação de ações mais sustentáveis neste setor (Yurtaslan et al., 2022).

A Comissão Europeia declarou que o setor têxtil apresenta um elevado potencial para a transição de uma economia circular. Assim, esta transição, associada a uma produção mais limpa e ao uso de fibras mais sustentáveis, pode reduzir significativamente os impactos ambientais associados à produção e ao consumo de têxteis na Europa (Köhler et al., 2021).

Atualmente, cada europeu produz anualmente cerca de 15 kg de resíduos têxteis, sendo que aproximadamente 65 % destes resíduos acabam em aterros, contribuindo para o desperdício de recursos. A reciclagem têxtil, além de ser uma alternativa mais sustentável para a gestão dos resíduos têxteis do que a incineração ou a deposição em aterros, promove a circularidade da indústria têxtil e permite a valorização dos seus resíduos, maximizando a utilização de matérias-primas e minimizando os impactos ambientais da produção têxtil (Damayanti et al., 2021; Määtänen, 2023).

Esta dissertação enquadra-se no projeto Be@t - Bioeconomia Têxtil e Vestuário, baseado na promoção e valorização da bioeconomia sustentável para o setor têxtil (BCSD Portugal, 2023). Inserido no pilar da circularidade, nomeadamente na Iniciativa 4, medida 3 associada à reutilização de fibras têxteis através de processos de reciclagem.

O principal objetivo deste projeto consiste na produção de fios utilizando um teor de, pelo menos, 50 % de fibras recicladas de base celulósica com um título Ne 30/1, de forma a poderem ser aplicados em estruturas têxteis comercializáveis.

Assim, a presente dissertação tem como principal objetivo é a produção de fios com diferentes teores de fibras de algodão recicladas, misturadas com fibras virgem de algodão e de liocel, de modo a obter um fio com qualidade e com o título pretendido.

As fibras recicladas são obtidas através da reciclagem mecânica de malhas e de tecidos, ambos 100 % algodão, provenientes de resíduos têxteis e utiliza-se a fiação convencional de anel para a produção dos fios.

Posteriormente, tanto as matérias-primas como os fios produzidos são caracterizados, nomeadamente ao nível do seu título e das suas propriedades mecânicas, realizando-se, ainda, um estudo de regularidade, pilosidade e análise das imperfeições dos fios.

Por fim, estes parâmetros de caracterização são comparados com os apresentados na base de dados *USTER® Statistics 2023*.

1.2 Apresentação da Empresa

O CITEVE, Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e de Vestuário, é uma organização privada sem fins lucrativos, ativa desde 1989 e sediada em Vila Nova de Famalicão. É uma organização de referência, tanto a nível nacional como europeu, cujo principal propósito é promover a inovação e o desenvolvimento técnico e tecnológico das empresas da indústria têxtil. Assim, disponibiliza uma ampla seleção de serviços desde ensaios laboratoriais, certificação de produtos, consultoria técnica e tecnológica até investigação e desenvolvimento, moda e design e, ainda, formações em diversas áreas. Além da forte relação com as empresas e o setor da indústria, desempenha um papel ativo na definição e implementação de políticas públicas e fomenta as ligações entre as universidades e as empresas do setor têxtil (CITEVE, 2023).

1.3 Contributos da Autora para o Trabalho

A reciclagem mecânica das malhas e dos tecidos resultantes de resíduos têxteis e a produção dos fios com a mistura de fibras de algodão recicladas e fibras virgem foram realizadas na linha piloto laboratorial do CITEVE, com a orientação e acompanhamento da Dr^a. Catarina Guise, da Cristina Pires e, ainda, do Eng. Filipe e do João.

Os ensaios de caracterização das estruturas têxteis, das fibras recicladas e dos fios produzidos foram realizados pelos Laboratórios Certificados do CITEVE.

1.4 Organização da Dissertação

A presente dissertação organiza-se, essencialmente, em seis capítulos, divididos em subcapítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução e enquadramento do projeto no qual se insere esta dissertação, explicando a necessidade da implementação de uma economia circular e do processo de reciclagem na indústria têxtil.

De seguida, o segundo capítulo expõe sucintamente um enquadramento teórico do tema desta dissertação, referindo-se à indústria têxtil, às fibras têxteis, ao processo de produção de fios e, finalmente, à reciclagem têxtil por via mecânica.

O terceiro capítulo apresenta os principais materiais utilizados, os processos de produção realizados e, ainda, os métodos de caracterização das matérias-primas e produtos obtidos.

Por sua vez, o quarto capítulo foca-se na apresentação, análise e discussão dos resultados de obtidos ao longo deste projeto.

O quinto capítulo resume as principais conclusões retiradas ao longo deste trabalho.

Por fim, o sexto capítulo apresenta uma avaliação do trabalho realizado, com uma análise do cumprimento dos objetivos propostos, bem como sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2 Contexto e Estado da Arte

2.1 Indústria Têxtil

A indústria têxtil é um dos setores economicamente mais importantes na Europa, contudo apresenta um impacto significativo no meio ambiente, uma vez que 4 a 6 % da pegada ecológica global se encontra associada ao consumo de têxteis (Köhler et al., 2021).

Em 2022, o mercado têxtil a nível mundial foi avaliado em cerca de 1 553 mil milhões de euros. É de salientar que as fibras naturais, nomeadamente o algodão, são amplamente utilizadas nesta indústria, liderando o mercado global e representando 44,1 % da receita desse mesmo ano. A região da Ásia-Pacífico domina o mercado têxtil, contribuindo para 53,41 % da receita global de 2022. A indústria têxtil é claramente dominada pelo setor da moda e vestuário, dado que foi responsável por 72,4 % da receita nesse ano. A segunda maior quota do mercado mundial pertence ao setor de têxteis-lar, seguido dos têxteis técnicos (Grand View Research, 2023).

A produção global de fibras têxteis aumentou, em 2021, para 113 milhões de toneladas, após um ligeiro declínio em 2020 associado à pandemia do COVID-19 (Fibre2Fashion, 2022). A Figura 1 apresenta a evolução da produção mundial de fibras ao longo dos últimos 48 anos e, ainda, uma previsão até 2030.

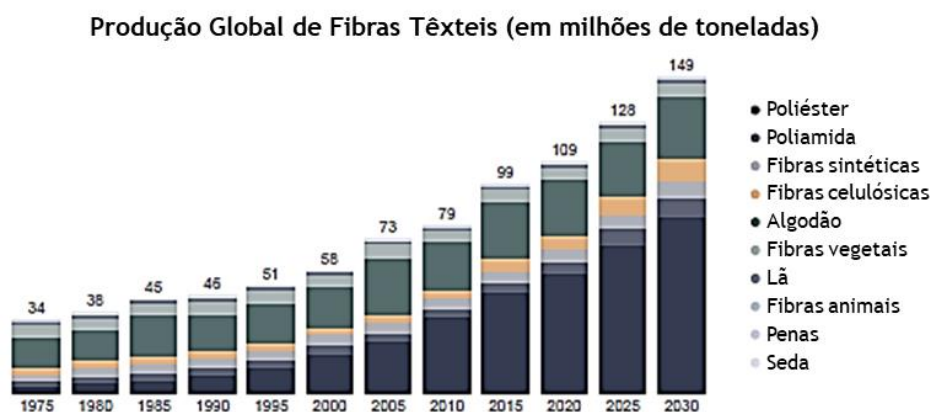


Figura 1. Evolução da produção mundial de fibras têxteis [Adaptada de (Textile Exchange, 2022)].

Nos últimos 20 anos a produção de fibras duplicou e é expectável que atinja os 149 milhões de toneladas em 2030 (Textile Exchange, 2022). Isto traduz-se numa estimativa de produção *per capita* de aproximadamente 17 kg de fibras têxteis, em comparação com os 14,3 kg por pessoa referentes a 2021 (Statista, 2023). Este aumento na produção de fibras tem um impacto significativo tanto na sociedade como no planeta, sendo por isso necessário e urgente aumentar a consciencialização para um uso mais responsável dos recursos (Textile Exchange, 2022). Além disso, a produção de fibras sintéticas à base de combustíveis fósseis continua a aumentar, sendo

de salientar que 56 % da produção global de fibras têxteis corresponde a fibras de origem fóssil (Fibre2Fashion, 2022).

A Figura 2 apresenta um diagrama circular relativo à produção global, em 2021, dos principais tipos de fibras têxteis.

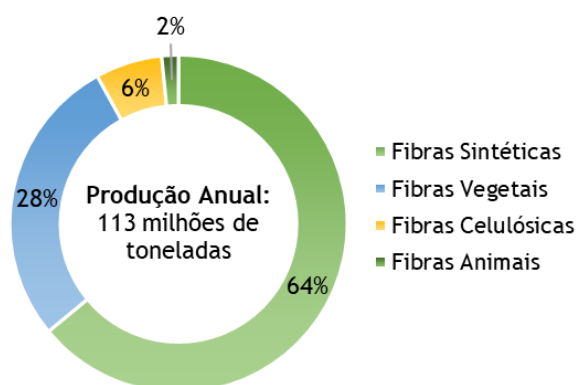


Figura 2. Produção global de fibras têxteis em 2021 [Adaptada de (Textile Exchange, 2022)].

O mercado de fibras sintéticas ultrapassou o do algodão desde metade da década de 90, sendo que, em 2021, foi responsável por 64 % da produção global de fibras têxteis (Statista, 2023). É de referir que mais de metade desta quota, cerca de 54 %, se encontra associada ao poliéster. A segunda maior quota de produção de fibras têxteis, tal como se pode observar no diagrama, corresponde às fibras vegetais, nomeadamente ao algodão que, em 2021, foi responsável por 22 % do mercado global de fibras. O algodão apresenta uma durabilidade notável no mercado de fibras têxteis e desempenhou um papel fundamental na Revolução Industrial (Lord, 2003; Textile Exchange, 2022).

Em 2021, a quota de produção de fibras recicladas foi de apenas 8,5 %. Contudo, menos de 1 % desta quota corresponde a fibras provenientes da reciclagem de têxteis pré ou pós-consumidor. Os restantes 7,9 % encontram-se associados à reciclagem de poliéster das garrafas de plástico, tornando o poliéster a fibra têxtil com maior percentagem de fibras recicladas, cerca de 15 % em 2021 (Fibre2Fashion, 2022; Textile Exchange, 2022). Salienta-se que a reciclagem de fibras tem vindo a aumentar ligeiramente ao longo dos anos, sendo que de 2020 para 2021 aumentou de 8,1 % para 8,5 %. No entanto, este aumento deve-se essencialmente à reciclagem do poliéster. Assim, continua a ser fundamental a investigação e o desenvolvimento da reciclagem de têxteis, tornando-a mais viável e apelativa (Textile Exchange, 2022).

Relativamente à capacidade de produção de produtos têxteis, mais de metade localiza-se na região da Ásia-Pacífico, sendo a China responsável por cerca de um quarto da produção global. Os outros grandes centros de produção têxtil são a Europa, os Estados Unidos da América e a Índia (Statista, 2023). É de mencionar que a União Europeia é o segundo maior importador e

exportador global de vestuário e têxteis, incluindo fibras e tecidos. A importação é liderada pelos Estados Unidos da América, enquanto o maior exportador é a China (Köhler et al., 2021).

2.1.1 Etapas da Produção de um Produto Têxtil

A Figura 3 apresenta o fluxograma da cadeia produtiva de um produto têxtil que consiste nas etapas de processamento, tanto químicas como mecânicas, necessárias para obter um produto final a partir de fibras têxteis (Shuvo, 2020).

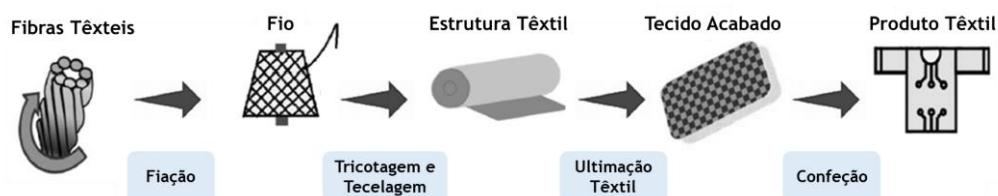


Figura 3. Fluxograma da cadeia produtiva de um produto têxtil [Adaptada de (Shuvo, 2020)].

As fibras têxteis são obtidas a partir de uma vasta gama de matérias-primas. O processo de fiação destas fibras permite a produção de um fio, que é trabalhado para produzir uma estrutura têxtil (Määttänen, 2023). Esta define-se como um conjunto de fibras ou fios que tem uma área de superfície substancial em relação à sua espessura e coesão suficiente para lhe conferir resistência mecânica (Houck, 2009). Para isso recorre-se à tricotagem, isto é, à produção de malhas através do cruzamento de fios, ou à tecelagem, ou seja, a construção de tecidos entrelaçando dois sistemas de fios, a teia e a trama. Podem, ainda, ser produzidos tecidos não tecido, conhecidos como TNT, nos quais as fibras têxteis são convertidas diretamente em tecido, não sendo necessária a fiação. Estas estruturas têxteis podem ser sujeitas a vários processos de ultimação têxtil, como operações de tratamento prévio, tingimento, estamparia ou acabamentos. Por fim, os produtos têxteis finais, como o vestuário, são produzidos a partir dos tecidos ou malhas obtidos anteriormente (Määttänen, 2023; Shuvo, 2020).

2.2 Fibras Têxteis

2.2.1 Definição e Classificação de Fibras Têxteis

As fibras têxteis consistem na unidade material elementar de todas as estruturas têxteis, sendo que a sua origem pode ser natural ou artificial (Houck, 2009). Segundo o Decreto-Lei nº 163/2004 de 3 de julho, Capítulo I, artigo 3º, ponto 2.a), entende-se por fibra têxtil “o elemento caracterizado pela sua flexibilidade, finura e grande comprimento relativamente à dimensão transversal máxima, que o tornam apto para aplicações têxteis” (Ministério da Economia, 2004).

Geralmente, possuem um diâmetro muito pequeno, entre 11 e 51 μm , e o seu comprimento pode variar entre alguns milímetros e vários metros (Houck, 2009). O comprimento das fibras influencia significativamente a resistência e uniformidade do fio e, ainda, a eficiência do processo de fiação (Kering & Textile Exchange, 2021).

As fibras têxteis podem ser constituídas por uma vasta variedade de materiais e são normalmente divididas em dois grupos, as naturais e as não-naturais (Houck, 2009; Piribauer & Bartl, 2019). A Figura 4 apresenta um esquema dos diferentes tipos de fibras com alguns exemplos.

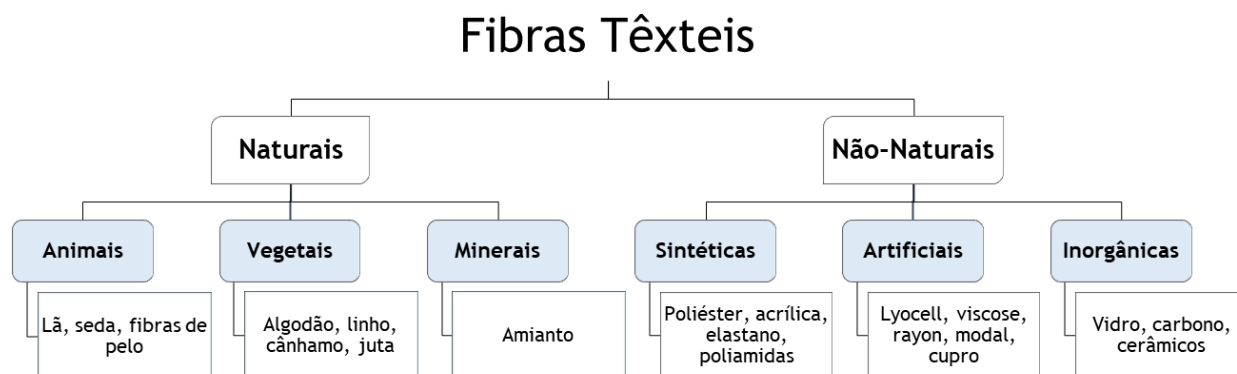


Figura 4. Classificação das fibras têxteis (Shuvo, 2020; Textile Exchange, 2022).

As fibras naturais referem-se às que podem ser encontradas naturalmente na Natureza e são categorizadas de acordo com a sua origem: as animais, as vegetais e as minerais. Este tipo de fibras apresenta como principais vantagens a biodegradabilidade, o peso reduzido, a baixa densidade e uma boa relação custo-eficácia, sendo uma alternativa mais sustentável (Smole et al., 2013; Subash & Muthiah, 2021).

Por outro lado, as fibras não-naturais, apesar de poderem ser constituídas por materiais naturais, não provêm diretamente da Natureza, sendo necessária a intervenção do Homem para a sua produção. Estas podem ser divididas em 3 categorias: as artificiais, obtidas através da transformação de polímeros orgânicos naturais; as sintéticas, produzidas a partir de polímeros sintéticos; e as inorgânicas, provenientes de materiais inorgânicos (Houck, 2009; Smole et al., 2013). O processamento de fibras artificiais encontra-se associado a elevados consumos de água e de energia e, ainda, à produção de efluentes químicos nocivos (Subash & Muthiah, 2021).

Adicionalmente, as fibras têxteis podem ser classificadas como fibras cortadas ou descontínuas ou como filamentos contínuos. As primeiras são geralmente fibras naturais e apresentam comprimentos relativamente curtos, entre 3,75 e 20 cm. Os filamentos possuem um comprimento elevado e indefinido, sendo maioritariamente fibras não-naturais, que podem ser produzidas com qualquer tamanho, sendo a seda o único filamento natural. Podem ser transformados em fios de filamentos contínuos ou convertidos em fibras cortadas (Houck, 2009; Lord, 2003).

2.2.2 Contextualização Histórica

A utilização de fibras têxteis remonta para 5000-4500 A.C., uma vez que desde o início da evolução humana surgiu a necessidade de desenvolvimento de vestuário para proteção contra o clima. Assim, as primeiras fibras têxteis foram fibras naturais como o cânhamo, o linho, o algodão, a lã e a seda. Até ao século XVII, a indústria têxtil era sobretudo um sistema de produção doméstica especializada. Só após a Revolução Industrial, nos séculos XVIII e XIX, é que foram surgindo alternativas às fibras naturais, juntamente com o aumento significativo das aplicações de fibras têxteis. Além disso, a Revolução Industrial levou à automatização dos processos de produção, tornando-os mais rápidos e eficientes. Nos 300 anos seguintes, o cenário da indústria têxtil sofreu grandes alterações devido ao desenvolvimento de novos métodos de produção e, ainda, ao aparecimento das fibras não-naturais. As primeiras fibras produzidas pelo Homem foram desenvolvidas no final do século XIX, mas a sua produção industrial só começou no século XX. Primeiro, surgiram as fibras celulósicas, como o rayon, e mais tarde as fibras sintéticas, como o poliéster e o nylon. Hoje em dia existe uma vasta gama de fibras que pode ser aplicada em produtos têxteis e ainda um elevado número de fibras alternativas em desenvolvimento. No século XXI, o principal objetivo é desenvolver fibras funcionais, inteligentes e sustentáveis adaptadas às necessidades do consumidor (Kiron, 2021; Sinclair, 2015).

2.2.3 Aplicações das Fibras Têxteis

A aplicação de fibras têxteis tem vindo a prosperar em diversas áreas, como a indústria automóvel, marinha, aeroespacial, eletrónica, construção civil, compósitos, nanotecnologia e engenharia biomédica, bem como na indústria de têxteis e vestuário (Shuvo, 2020).

Estas necessitam de ter propriedades específicas em função da sua aplicação, dado que determinam as características do têxtil. Assim, nem todas as fibras são viáveis para aplicações têxteis, uma vez que devem possuir determinadas propriedades físicas, mecânicas e térmicas, bem como algumas propriedades químicas, como a capacidade de ser tingida com corantes ou pigmentos (Shuvo, 2020).

O algodão é a fibra natural mais utilizada a nível mundial devido ao baixo custo e às suas excelentes propriedades, como a elevada resistência, absorção e capacidade de retenção de cor (Smole et al., 2013). Mais recentemente, tem-se realizado uma forte investigação de fibras naturais de sisal, linho, cânhamo, banana e juta para potenciais aplicações em vestuário e em compósitos (Shuvo, 2020).

2.3 Processo de Produção de Fios

2.3.1 Definição e Tipos de Fios

Um fio é definido como um elemento têxtil de comprimento considerável e secção transversal relativamente pequena, constituído por fibras têxteis, com ou sem torção (BISFA, 2017). Consiste num conjunto linear longo e contínuo de fibras interligadas entre si, adequado para a produção de estruturas têxteis e utilização na costura, tecelagem, tricotagem, bordados e até cordas (Kering & Textile Exchange, 2021).

A estrutura e as características de um fio dependem das propriedades da matéria-prima e do seu processo de produção (Alagirusamy & Das, 2015).

Para a caracterização de um fio é fundamental avaliar diversos parâmetros, nomeadamente a massa linear, a torção, propriedades mecânicas como a resistência à rotura e, ainda, a qualidade do fio através da regularidade, presença de imperfeições e pilosidade (Sinclair, 2015).

A massa linear de um fio é um dos parâmetros mais importantes e corresponde a uma relação entre o peso e o comprimento. Esta é definida pelos sistemas de numeração de fios, diretos ou indiretos. Os primeiros consistem numa numeração diretamente proporcional que expressa o peso do fio por unidade de comprimento e é utilizada normalmente para fio de filamentos contínuos, sendo o tex e o denier dois exemplos desta numeração. Por outro lado, os sistemas indiretos são utilizados para os fios fiados e correspondem a uma numeração inversamente proporcional, ou seja, quanto maior for o valor de massa linear, mais fino é o fio. As unidades mais comuns são o número métrico, Nm, e o número inglês, Ne, muito associado ao algodão. A indústria têxtil, nomeadamente a fição, recorre geralmente ao Ne para se referir à massa linear de um fio (Kering & Textile Exchange, 2021; Sinclair, 2015).

Existem diversos tipos de fios, contudo, classificando-os de acordo com as fibras têxteis que os constituem, os mais comuns são o fio fiado e o fio de filamento contínuo (BISFA, 2017).

Um fio de filamento contínuo consiste num conjunto de filamentos combinados e dispostos ao longo do comprimento do fio (Alagirusamy & Das, 2015). A produção deste tipo de fios é um processo mecânico, sendo, normalmente, produzidos por extrusão e estirados até atingirem o comprimento e a densidade linear desejados (Lord, 2003). Este tipo de fios apresenta elevada resistência e uniformidade, sendo possível obter fios muito finos (Alagirusamy & Das, 2015).

Por outro lado, o fio fiado é produzido através da torção de fibras descontínuas entre si, de modo a formar um fio contínuo e coeso (Kering & Textile Exchange, 2021).

A produção de fios fiados consiste num conjunto de transformações mecânicas realizadas a seco numa série de máquinas, permitindo converter a rama de fibras cortadas num fio fiado contínuo (Kering & Textile Exchange, 2021).

É possível produzir dois tipos de fios, os cardados e o penteados. A sua produção encontra-se dividida em várias etapas: linha de abertura, limpeza e mistura; cardação; estiragem; produção da mecha e a fiação propriamente dita (Alagirusamy & Das, 2015; Lord, 2003).

No caso dos fios penteados realiza-se, adicionalmente, uma etapa de penteação, após a estiragem e antes da produção da mecha. Tem como principal objetivo a remoção de fibras curtas, neps e outras impurezas, permitindo ainda melhorar a orientação e o alinhamento das fibras (Alagirusamy & Das, 2015; Lord, 2003). É de salientar que os fios penteados apresentam maior qualidade, sendo normalmente mais finos, mais fortes, mais suaves e mais uniformes do que os fios cardados (Kering & Textile Exchange, 2021).

2.3.2 Produção de Fios Cardados

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática das várias etapas do processo de produção de fios cardados.

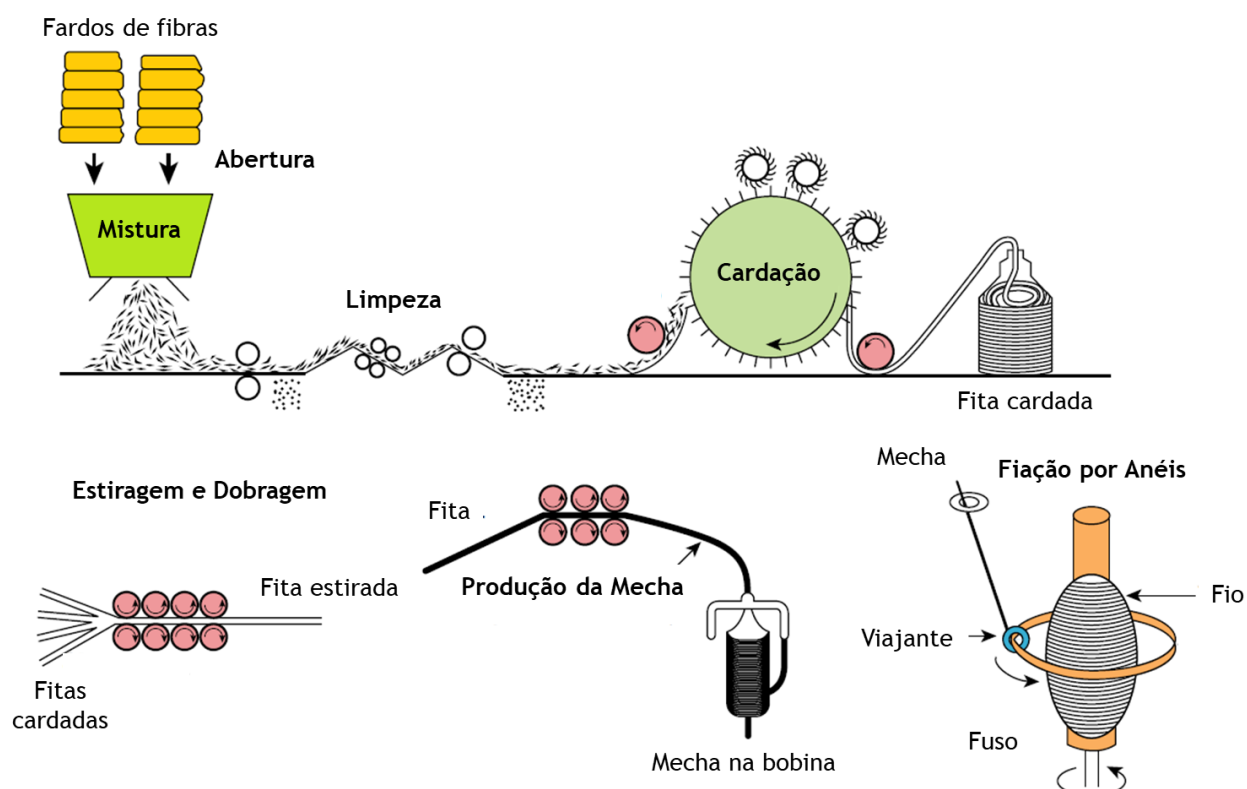


Figura 5. Representação esquemática do processo de produção de fios cardados [Adaptada de (Alagirusamy & Das, 2015)].

A primeira etapa, designada por **linha de abertura, limpeza e mistura**, é constituída por um conjunto de máquinas, dispostas em série, com um sistema de transporte, geralmente através de correntes de ar, que garante o fluxo das fibras. Hoje em dia, esta etapa é quase completamente automatizada. Tem como principais funções a abertura, limpeza e mistura das fibras têxteis, de modo a obter uma rama o mais homogênea possível e permitir a sua cardação. Normalmente, as fibras descontínuas são fornecidas em fardos altamente comprimidos, sendo necessário serem desintegrados em aglomerados mais pequenos de fibras. Além disso, as poeiras, sementes e outras impurezas devem ser removidas, de modo a não interferirem na fiação nem afetarem a qualidade do fio (Alagirusamy & Das, 2015; Lord, 2003).

A etapa seguinte corresponde à **cardação** que permite não só a limpeza e mistura da rama de fibras, mas também promove a orientação e condensação das mesmas (Kering & Textile Exchange, 2021). Os aglomerados de fibras são alimentados à carda e sujeitos à ação dos dentes metálicos do dispositivo cilíndrico no interior do equipamento. As fibras individualizadas são transferidas para o cilindro principal, sob a forma de um manto que será, posteriormente, condensado e transformado numa fita cardada (Alagirusamy & Das, 2015; Lord, 2003).

Posteriormente, recorre-se ao processo de **estiragem** para garantir a paralelização das fibras para a produção do fio (Elhawary, 2015). Esta etapa é efetuada num equipamento designado por laminador e permite a combinação de diferentes fitas, originando uma ação de dobragem. A estiragem consiste num processo de alongamento da fita que promove o alinhamento e orientação das fibras, aumenta a uniformidade e reduz a densidade linear da fita (Lord, 2003).

Após o sistema de estiragem, constituído por 3 ou 4 pares de rolos de aço, a fita estirada passa por um condensador, aumentando a sua coesão. Obtém-se uma fita mais fina, designada por **mecha**, à qual se adiciona uma pequena torção para a tornar mais estável, antes de ser armazenada em bobinas. É necessário haver um compromisso entre produzir uma mecha com torção suficientemente elevada para ser resistente e produzir fios com menor pilosidade, mas também baixa o suficiente para permitir uma estiragem adequada no contínuo de fiação (Kering & Textile Exchange, 2021; Lord, 2003).

2.3.2.1 Tecnologias de Fiação

A etapa seguinte da produção de fios cardados corresponde à **fiação propriamente dita**, que consiste, essencialmente, em processos de estiragem e torção (Lord, 2003). Atualmente, existem diversas tecnologias de fiação, desde a convencional, conhecida como fiação de anel, até sistemas não convencionais, como a fiação a rotor, conhecida como *open-end*, e a fiação a jato de ar, mais conhecida como *air-jet* (Alagirusamy & Das, 2015). Estes últimos foram desenvolvidos com o objetivo de melhorar a taxa de produção da fiação convencional. A maior parte destas tecnologias de fiação foram desenvolvidas nos séculos XIX e XX (Elhawary, 2015).

Fiação Convencional

A fiação convencional de anel foi inventada, em 1832, por *John Thorp*. É o método de fiação mais utilizado na indústria têxtil, sendo responsável pela produção de cerca de 70 % dos fios fiados a nível mundial (Elhawary, 2015).

A popularidade desta técnica pode ser atribuída à sua versatilidade em termos da gama de comprimentos e tipos de fibras que podem ser processados e à diversidade de massas lineares dos fios produzidos. Além disso, permite produzir fios mais resistentes, mais finos, homogêneos, com baixa rigidez e elevada tenacidade. Contudo, apresenta algumas desvantagens como a baixa produtividade, elevados consumos energéticos, uma grande geração de calor, elevadas tensões dos fios produzidos e depende de um operador para reparar manualmente as quebras do fio (Elhawary, 2015; Lord, 2003).

Uma máquina de fiação de anel possui entre 60 e 120 fusos de fiação, cada um associado a um sistema de estiragem e um dispositivo de torção. A torção é inserida no fio através da ação do viajante, uma peça em forma de C que desliza num anel à volta do fuso. Assim, as mechas são alimentadas ao contínuo de fiação, atravessam um sistema de estiragem de rolos, é-lhes conferida torção no fuso de fiação, produzindo-se fio (Lord, 2003).

Fiação Não Convencional

A **fiação a rotor ou *open-end*** é um dos métodos alternativos de fiação e ocupa o segundo lugar em termos de produção de fios fiados, representando cerca de 30 a 35 % do mercado global de têxteis e vestuário (Kiron, 2022b). Esta tecnologia produz fios mais ásperos, mais absorventes e com menor resistência à rotura, limitando a sua utilização em produtos têxteis. Assim, o fio *open-end* é, geralmente, utilizado em fios grossos ou médios para a produção de gangas, meias e têxteis-lar, como toalhas e cobertores (Kering & Textile Exchange, 2021). Apesar de ser um método menos versátil do que a fiação convencional, é um processo contínuo, apresenta uma velocidade de produção 5 a 10 vezes mais rápida e menores custos energéticos (Elhawary, 2015).

Outra tecnologia alternativa é **fiação a jato de ar**, na qual é possível atingir velocidades de produção entre 150 e 450 m·min⁻¹, contudo os fios obtidos apresentam baixa resistência e alongamento, mas possuem uma boa suavidade. Além disso, possui baixos custos de manutenção, é um sistema automatizado e permite a eliminação da etapa de produção da mecha (Elhawary, 2015; Kiron, 2022a, 2022b).

2.4 Reciclagem Têxtil

Devido ao crescimento acelerado da população mundial e uma crescente preferência do consumidor pela *fast fashion*, a produção e o consumo de produtos têxteis aumentaram

consideravelmente, promovendo uma maior quantidade de resíduos (Ichim & Sava, 2022). Segundo Zhang (2023), estima-se que, na Europa, são produzidas anualmente cerca de 95 milhões de toneladas de resíduos têxteis. É de salientar que cerca de 87 % desses resíduos são depositados em aterros ou incinerados, provocando um impacto consideravelmente negativo no meio ambiente e, ainda, um desperdício de matérias-primas (European Parliament News, 2023).

A indústria têxtil é um dos setores, a nível mundial, responsáveis por uma elevada quantidade de resíduos, uma vez que praticamente todas as etapas do processo de produção de um produto têxtil geram resíduos (Arafat & Uddin, 2022). Considerando a produção anual global de vestuário à base de algodão, estima-se que esta se encontre associada à produção de cerca de 7,8 milhões de toneladas de resíduos de fibras e cerca de 3,8 milhões de toneladas de resíduos têxteis (Johnson et al., 2020).

Os resíduos têxteis podem ser divididos em dois grupos: os pré-consumo, resultantes dos processos de produção de fibras, fios e produtos têxteis, e os pós-consumo, que consistem essencialmente em produtos têxteis utilizados e descartados pelo consumidor (Arafat & Uddin, 2022; Ichim & Sava, 2022).

A reciclagem é fundamental para a implementação da economia circular na indústria têxtil. De acordo com a Diretiva 2008/98/CE, a reciclagem envolve qualquer operação de recuperação através da qual os resíduos são transformados em novos produtos, materiais ou substâncias, tanto para o mesmo propósito que o material original como para outros, sendo que não se encontra incluída a recuperação de energia nem a utilização dos resíduos como combustível (Määtänen, 2023; Piribauer & Bartl, 2019).

A reciclagem de resíduos têxteis apresenta vantagens, tanto a nível económico como ambiental, dado que promove a conservação de recursos, a redução de vários tipos de poluição e a diminuição considerável da quantidade de recursos a serem depositados em aterros (Candido, 2021; Ichim & Sava, 2022; Kiran et al., 2021).

Uma das principais limitações à implementação da reciclagem têxtil relaciona-se com a mistura de diferentes fibras, característica de diversos produtos, o que dificulta a triagem adequada dos resíduos têxteis e, ainda, a necessidade de um processamento prévio dos resíduos para a remoção de botões, fechos e outros materiais que não podem ser reciclados. Assim, é essencial a criação de sistemas de recolha de resíduos têxteis e centros de triagem automatizados para tornar este processo mais eficiente (Candido, 2021; Duhoux et al., 2021; Ribul et al., 2021).

A reciclagem têxtil pode ser classificada em reciclagem química e reciclagem mecânica. A primeira consiste, essencialmente, no tratamento químico dos resíduos têxteis, sendo possível a produção de fibras com características específicas. Este processo é aplicado principalmente a fibras não-naturais. Por outro lado, a reciclagem mecânica corresponde ao processo de

transformação dos resíduos através da sua trituração, convertendo-os em fibras para a produção de novos fios e, posteriormente, novos produtos têxteis (Hawley, 2014; Määttänen, 2023; Malinverno et al., 2023).

É de enfatizar que, atualmente, ambos os métodos de reciclagem têxtil são utilizados principalmente em sistemas *open-loop*, ou seja, os resíduos reciclados serão utilizados com uma finalidade diferente da original (Malinverno et al., 2023).

2.4.1 Reciclagem Mecânica

O processo de reciclagem mecânica consiste essencialmente em três etapas: a triagem, o corte e a desfibração. Primeiramente, os resíduos têxteis são selecionados e alimentados à secção de corte, que os transforma em retalhos mais pequenos. De seguida, são triturados e sofrem várias ações mecânicas, sendo este processo designado por desfibração. Este permite a obtenção de uma rama de fibras que pode ser utilizada para a fiação de novos fios e em novos produtos têxteis, desde malhas, tecidos e tecidos não-tecidos (Hawley, 2014; Johnson et al., 2020).

Apesar de praticamente qualquer resíduo têxtil poder ser reciclado mecanicamente, este método é aplicado maioritariamente a fibras naturais. Apresenta um baixo custo associado, contudo reduz consideravelmente o comprimento das fibras descontínuas, diminuindo a sua qualidade, resistência e suavidade, afetando as características dos produtos finais (Määttänen, 2023; Malinverno et al., 2023). Assim, as fibras recicladas são, geralmente, misturadas com outras fibras têxteis virgens, de modo a controlar esta perda de qualidade e permitir a sua incorporação em produtos têxteis. Normalmente, na reciclagem mecânica utilizam-se apenas os resíduos pré-consumo, uma vez que o desgaste mecânico dos resíduos pós-consumo origina fibras com qualidade reduzida (Hawley, 2014; Johnson et al., 2020; Määttänen, 2023).

A utilização do processo de reciclagem mecânica para obtenção de fibras apresenta diversas vantagens em relação à utilização de matérias-primas virgem, promovendo uma diminuição significativa da quantidade de recursos utilizada. Na reciclagem de fibras naturais, como o algodão, verifica-se que esta redução ocorre não só ao nível das matérias-primas, mas também de recursos energéticos, consumo de água, consumo de combustíveis e de produtos químicos. Na reciclagem de fibras não-naturais observa-se uma redução de cerca de 60 % dos consumos energéticos e de 30 % das emissões gasosas. Adicionalmente, permite a diminuição da utilização de tintas ou corantes através da reciclagem de estruturas têxteis já tingidas (Candido, 2021; Kiran et al., 2021).

A obtenção de fibras recicladas mecanicamente é o processo de reciclagem têxtil mais económico. Além disso, é o processo que se encontra mais desenvolvido, promovendo a sua aplicação a nível industrial (Duhoux et al., 2021; Kiran et al., 2021).

Atualmente, o principal desafio da aplicação da reciclagem mecânica na indústria têxtil é a dificuldade de obtenção de fibras e, conseqüentemente, de produtos têxteis de elevada qualidade, devido ao comprometimento da integridade das fibras durante o processo de reciclagem têxtil (Ribul et al., 2021). Uma rama de fibras recicladas é caracterizada pela existência de uma vasta gama de comprimentos de fibras, uma notável presença de fibras curtas e, frequentemente, verifica-se a existência de restos de fios ou retalhos das estruturas têxteis que foram recicladas, o que dificulta a incorporação de fibras recicladas em fios e estruturas têxteis (Candido, 2021).

Além disso, é fundamental o desenvolvimento e aperfeiçoamento da reciclagem mecânica, de modo a aumentar a sua implementação, acessibilidade e promover a diminuição do custo de produtos com fibras recicladas, tornando este processo de reciclagem têxtil economicamente rentável (Candido, 2021; Duhoux et al., 2021; Ribul et al., 2021).

Apesar da reciclagem mecânica ainda necessitar de ser bastante estudada e desenvolvida, ao longo dos últimos anos já se realizaram alguns trabalhos de investigação nesta área (Jamshaid et al., 2021). Estudou-se maioritariamente a utilização de resíduos têxteis para a produção de fibras recicladas para fios open-end (M. T. Halimi et al., 2008). Os investigadores avaliaram não só a eficiência deste processo de incorporação de fibras recicladas, mas também o efeito da quantidade de fibras recicladas na qualidade do fio produzido (Khan & Rahman, 2018; Wanassi et al., 2016). Além disso, existem diversos estudos sobre a influência dos parâmetros de produção nas propriedades do fio produzido, sendo maioritariamente considerada a fiação open-end (Baykal & Babaarslan, 2003; M.T. Halimi et al., 2007; Hasani & Tabatabaei, 2010; Hasani et al., 2012). Mais recentemente, começou-se a estudar a produção de fios, incorporando fibras recicladas, recorrendo à fiação de anel, comparando esta tecnologia com a fiação open-end (Yilmaz et al., 2017). É de salientar que o algodão e o poliéster são as fibras têxteis mais investigadas ao nível da reciclagem mecânica, sendo, por isso, as mais propensas a serem recicladas (Malinverno et al., 2023).

2.4.2 Fibras Recicladas no Mercado

Hoje em dia, a utilização de fibras recicladas já adquiriu uma enorme importância no sector têxtil, devido ao aumento da consciencialização ambiental por parte dos consumidores e às obrigações legais que requerem uma maior sustentabilidade, tanto dos produtos como dos processos de produção (Arafat & Uddin, 2022).

A *Recover™* destaca-se no setor da reciclagem mecânica, focando-se na produção de fibras de algodão recicladas, utilizando resíduos têxteis como matéria-prima. Promove a circularidade da indústria têxtil e uma produção sustentável e com baixo impacto ambiental associado. Apresenta gamas próprias de produtos com fibras recicladas, como a *RCotton* e a *RColorBlend*,

e colabora com outras marcas em coleções com materiais reciclados e sustentáveis, sendo a *Primark* uma dessas marcas (Recover, 2023).

A *Polopiqué* é uma empresa portuguesa que incorporou as fibras de algodão recicladas da *Recover*TM no seu processo de produção, reduzindo significativamente a sua pegada ecológica. Possui, ainda, uma gama de produtos com poliéster reciclado e têxteis com pelo menos 50 % de algodão orgânico (Polopiqué, 2023).

A *CYCLO*[®] é conhecida pela reciclagem mecânica de desperdícios têxteis dos fabricantes de vestuário no Bangladesh, transformando-os em novas fibras e fios sem recorrer ao consumo de água, produtos químicos ou corantes. Assim, as fibras recicladas *CYCLO*[®] são uma das alternativas têxteis mais amigas do ambiente (CYCLO, 2023).

A *REPREVE*[®] é uma das marcas líder de fibras produzidas a partir de materiais reciclados, sendo conhecida pelas fibras de poliéster provenientes de materiais reciclados (REPREVE, 2023).

O grupo *Dockers*[®] apresenta 25 % da sua linha de roupa com fibras recicladas, tanto de algodão como de poliéster, sendo este último obtido essencialmente a partir de garrafas de plástico (Dockers, 2023).

A *Pure Waste*[®] é uma empresa que comercializa malhas e vestuário de alta qualidade, produzido a partir de fibras 100 % recicladas, tanto de algodão como de poliéster, recorrendo ao aproveitamento da cor dos resíduos têxteis (Pure Waste, 2023).

O grupo H&M tem sido um dos principais impulsionadores da transição da indústria têxtil para uma economia circular, garantindo que pretende que, até 2025, 30 % das suas matérias-primas sejam recicladas. É de salientar que 100 % do algodão dos seus produtos têxteis é reciclado ou obtido de forma sustentável. Além disso, em 2020, foi responsável pela recolha de 18 800 toneladas de roupa e têxteis através do seu programa de Recolha de Roupa (H&M, 2023).

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos os materiais aos quais se recorreu ao longo deste projeto, nomeadamente as malhas e os tecidos 100 % algodão, o processo de reciclagem mecânica utilizado para transformar estes resíduos têxteis em fibras e o processo de produção de fios com mistura das fibras recicladas obtidas e fibras virgem. Abordar-se-á, ainda, os ensaios de caracterização realizados, tanto ao nível das matérias-primas como dos fios produzidos, e a base de dados utilizada para comparação dos resultados obtidos.

3.1 Reciclagem Mecânica

Primeiramente, realizou-se a reciclagem mecânica de 10 kg de malha 100 % algodão proveniente de restos de confeção de uma empresa têxtil, sendo que se utilizou 5 kg de malha branca e 5 kg de malha cinza.

Após a seleção dos resíduos têxteis, o processo de reciclagem mecânica é constituído essencialmente por duas etapas: o corte e a desfibrção. Estas foram realizadas, respetivamente, na máquina de corte do modelo *Starcut 500* e na desfibradora do modelo *Cadette*. A Figura 6 apresenta fotografias destes equipamentos, ambos da marca *LAROCHE*.

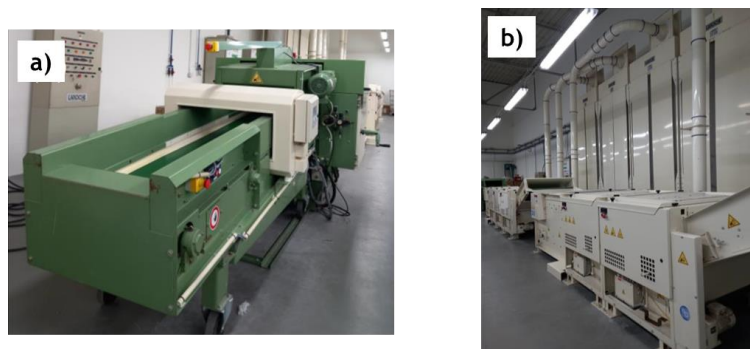


Figura 6. Equipamentos da reciclagem mecânica: a) máquina de corte e b) desfibradora.

A máquina de corte consiste num sistema de corte rotativo com duas lâminas, no qual é possível seleccionar o tamanho de corte e definir o número de passagens do material no equipamento.

A desfibradora utilizada é constituída por 5 módulos, divididos em duas secções, uma com três módulos e outra com os restantes dois. Estas secções possuem dois cilindros de compactação à entrada e funcionam de forma independente, permitindo um maior controlo e manipulação do material a ser reciclado. Cada módulo da desfibradora possui um tapete e um cilindro de alimentação que, além de realizar uma compactação adicional, encaminha o material para o cilindro de desfibrção que contém pinos de aço na sua superfície. Existe ainda um sistema de triagem que, de acordo com o tamanho do material, encaminha-o para o módulo seguinte ou rejeita-o, voltando ao início. Assim, este equipamento permite a obtenção de fibras recicladas através da desconstrução das estruturas têxteis e dos fios incorporados nas mesmas, sendo

possível manipular as velocidades dos tapetes de alimentação e de rotação dos cilindros de desfibrção e, ainda, a distância entre os tapetes e os cilindros.

A Figura 7 apresenta um esquema do processo de reciclagem mecânica realizado.

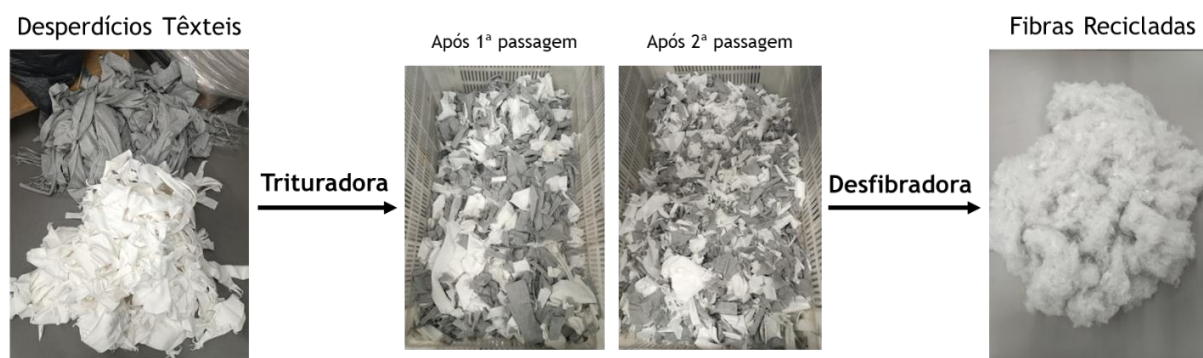


Figura 7. Representação esquemática do processo de reciclagem mecânica.

Assim, colocou-se os 10 kg de desperdícios têxteis na máquina de corte, selecionando um corte de 30 mm, e realizou-se 2 passagens para garantir uma maior uniformidade dos retalhos obtidos. Posteriormente, de modo a diminuir o atrito entre os pedaços de malha e o desfibrador, aplicou-se um lubrificante anti-estático com uma diluição de 1:10, numa quantidade correspondente a cerca de 3 % da quantidade de malha que foi reciclada. Estes retalhos de malha de algodão foram então alimentados à desfibradora, na qual se configurou as velocidades tanto dos cilindros de desfibrção como dos tapetes de alimentação, obtendo-se uma rama mescla de fibras recicladas. A Tabela 1 apresenta as velocidades utilizadas neste processo de reciclagem mecânica, tendo estas sido selecionadas de acordo com ensaios realizados anteriormente pela entidade acolhedora com malhas de algodão.

Tabela 1. Parâmetros operacionais utilizados na desfibradora.

Módulo da Desfibradora	1	2	3	4	5
Velocidade do Cilindro de Desfibrção [rpm]	1648	1798	1998	2148	2301
Velocidade do Tapete de Alimentação [$m \cdot min^{-1}$]	0,86	1,00	1,10	1,50	2,00

É de referir que foi possível obter 9,3 kg de fibras de algodão recicladas, ou seja, houve um desperdício de apenas cerca de 7 % dos 10 kg de malha que se pretendia reciclar.

Adicionalmente, realizou-se a reciclagem mecânica de três tecidos 100 % algodão com padrões diferentes, reciclando-se cerca de 1 kg de cada um, ou seja, 3 kg de tecido. De modo a permitir a comparação com as fibras de algodão recicladas obtidas anteriormente, efetuou-se um processo de reciclagem mecânica semelhante, utilizando os mesmos parâmetros operacionais, tanto na máquina de corte como na desfibradora. Contudo, foi necessário efetuar duas passagens na desfibradora, dado que após a 1ª passagem, a rama ainda apresentava uma grande quantidade de retalhos de tecido e era constituída maioritariamente por fios e não fibras.

3.2 Processo de Produção dos Fios

A Figura 8 apresenta as diferentes etapas do processo de fiação, ou seja, da incorporação das fibras têxteis na produção de um fio. Todos os equipamentos utilizados durante este processo são da marca MESDAN LAB.

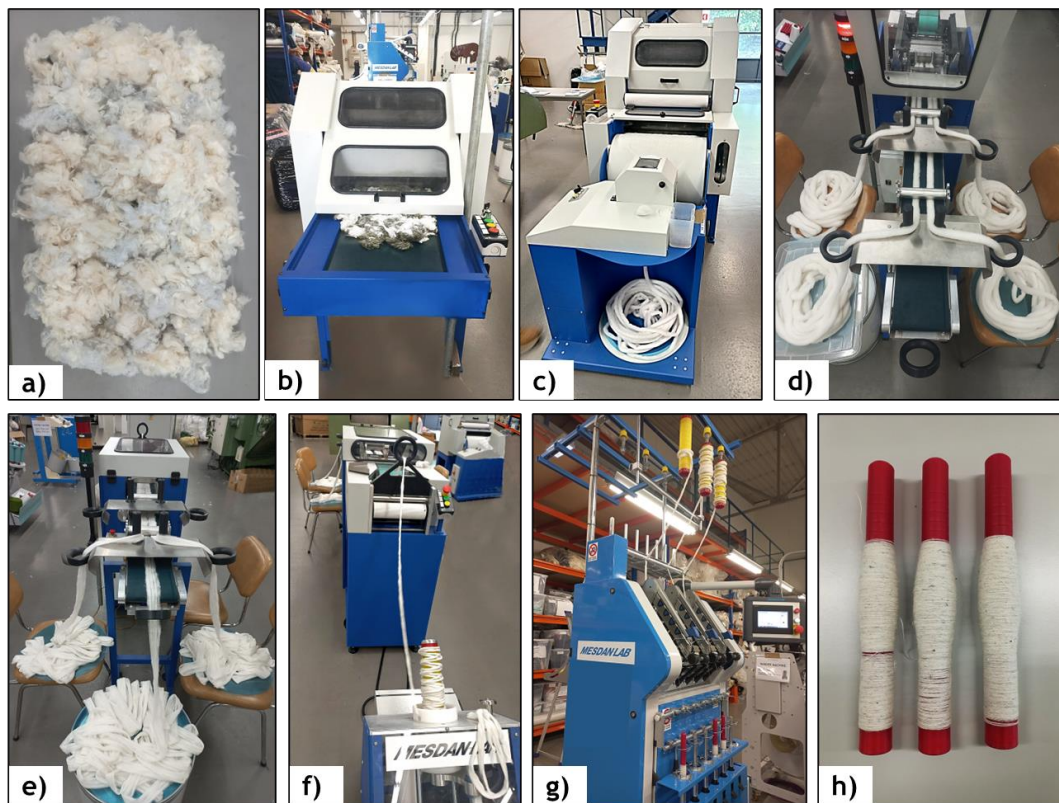


Figura 8. Etapas do processo de produção dos fios: a) mistura de fibras recicladas com fibras virgem, b) carda das fibras, c) produção da fita cardada, d) 1ª passagem no laminador, e) 2ª passagem no laminador, f) produção da mecha, g) contínuo de fiação de anel e h) fios obtidos.

Em primeiro lugar, as fibras recuperadas por reciclagem mecânica foram misturadas com fibras virgens, nas proporções pretendidas, para produção de fio (Figura 8.a)). A homogeneização desta mistura foi feita manualmente.

De seguida, alimentou-se à carda uma mistura de cerca de 75 g de fibras têxteis (Figura 8.b)). Realizou-se este processo duas vezes, ou seja, efetuando-se no total a carda de 150 g de fibras para cada um dos fios produzidos. A carda permitiu, primeiramente, a produção de um manto de fibras e, após uma 2ª passagem na carda, obteve-se uma fita cardada (Figura 8.c)). A velocidade de alimentação da rama de fibras à carda foi de aproximadamente $9,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, sendo ainda possível regular a velocidade de produção da fita da carda.

As fitas resultantes deste processo de carda foram então divididas a meio, originando quatro fitas que foram alimentadas ao laminador (Figura 8.d)), onde ocorre a regularização e paralelização das fibras. Este equipamento possui um mecanismo de roldanas cuja disposição determina a estiragem teórica que está a ser aplicada às fitas. Tal como na carda, realizaram-

se duas passagens no laminador. A primeira transformou as quatro fitas cardadas numa só fita, enquanto a segunda converte as fitas numa mecha através da aplicação de uma torção parcial recorrendo a uma espécie de torce no final do processo de laminagem (Figura 8.e)) e Figura 8.f)). O número de fitas que deve ser alimentado ao laminador na 2ª passagem é determinado de acordo com os cálculos exemplificados no Apêndice A . É de mencionar que é possível alterar a velocidade de enrolamento da mecha na bobina, tendo-se regulado entre 5 e 6 m·min⁻¹.

A mecha obtida alimentou o contínuo de fiação de anel, onde se realiza a fiação propriamente dita (Figura 8.g)). Este equipamento estira a mecha e confere-lhe torção, permitindo a produção do fio, sendo este armazenado em canelas (Figura 8.h)). Assim, é necessário determinar, através de equações empíricas, os valores teóricos de estiragem e torção que serão utilizados como estimativas iniciais no contínuo de fiação para a produção de fio com o título pretendido. Para isso, mediu-se a gramagem da mecha, correspondente ao peso de um metro de mecha, e determinou-se o seu título, Ne , através da Equação (1).

$$Ne = \frac{0,59}{\text{Gramagem [g} \cdot \text{m}^{-1}]}$$
 (1)

De seguida, considerando que se pretende produzir um fio com um título de 30/1, aplicou-se a Equação (2) para determinar o valor teórico de estiragem, E , e a Equação (3) para a torção, T .

$$E = \frac{Ne_{\text{pretendido}}}{Ne_{\text{mecha produzida}}}$$
 (2)

$$T = k \times \sqrt{Ne_{\text{pretendido}}}$$
 (3)

O coeficiente de torção, k , depende da composição do fio e do tipo de fibras que nele vão ser incorporadas, tendo sido considerado igual a 4. A torção é obtida em voltas·polegada⁻¹, sendo necessário convertê-la para voltas·m⁻¹ para introduzir no equipamento.

No contínuo de fiação, inseriu-se os valores teóricos obtidos para os parâmetros de estiragem e torção e, ainda, um valor de pré-estiragem e o de velocidade de rotação do fuso, sendo que este último se manteve constante e no valor mínimo do equipamento, 5400 rpm, ao longo de toda a produção. A velocidade de alimentação é determinada automaticamente pelo equipamento em função dos outros valores inseridos. Após configurar todos os parâmetros mencionados anteriormente, iniciou-se a produção do fio e foi-se ajustando os valores dos parâmetros, de modo a ser possível a fiação das mechas em questão e a obtenção de um fio com qualidade e sem muitas quebras durante a sua produção. A redução da estiragem permite diminuir as quebras do fio, enquanto o aumento da torção possibilita a obtenção de fios mais resistentes. Assim, pretende-se não só garantir a estabilidade do processo de fiação, mas também a produção de um fio com boa resistência. É, ainda, de mencionar que, tanto na produção da mecha no laminador como na produção do fio no contínuo de fiação, se definiu o sentido da torção como Z, ou seja, realizou-se a torção do fio para a esquerda.

Por fim, recorreu-se a uma meadeira, da marca *Zweigle*, modelo *L-232*, para determinar o título do fio produzido, através da Equação (4). É de referir que este cálculo não é rigoroso, sendo realizado apenas para controlo do título do fio produzido. Posteriormente, os fios foram analisados em laboratório e o seu título foi determinado de acordo com a norma *International Organization for Standardization*, ISO 2060:1994.

$$Ne = \frac{\text{Comprimento do fio [m]}}{\text{Peso [g]}} \times 0,59 \quad (4)$$

Após o processo de fiação, procedeu-se à vaporização dos fios produzidos para estabilizar a torção aplicada e minimizar o efeito da tensão. Assim, recorrendo a um tanque de água controlado por um termostato da marca *Grant* e modelo *OLS Aqua Pro*, colocou-se os fios, nas respetivas canelas, num banho a 80 °C durante cerca de 40 min. É de salientar que as canelas são colocadas num suporte, acima do nível da água, ficando apenas expostas ao vapor de água produzido pelo aquecimento. Posteriormente, utilizou-se uma estufa ventilada, da marca *WTB Binder* e modelo *B53*, a cerca de 40 °C, até aos fios estarem completamente secos. A Figura 9 apresenta fotografias dos dois equipamentos utilizados para a vaporização dos fios.



Figura 9. Fotografias dos equipamentos utilizados na vaporização dos fios: banho termostático, à esquerda, e estufa ventilada, à direita.

Finalmente, procedeu-se à bobinagem dos fios, ou seja, à transferência dos fios das canelas, onde foram colocados durante a fiação, para cones. A Figura 10 apresenta uma fotografia deste processo, no qual se recorreu a uma bobinadeira, da marca *FADIS S.p.A.*, a uma velocidade de cerca de 100 m·min⁻¹.



Figura 10. Fotografia do processo de bobinagem dos fios.

3.2.1 Fios com Fibras Recicladas Provenientes das Malhas

Primeiramente, produziu-se um fio com uma composição de 50 % das fibras de algodão obtidas por reciclagem mecânica das malhas e 50 % de fibras de algodão virgem. Uma vez que não foi possível obter um fio com um título Ne 30/1 com a composição anterior, diminui-se o teor de fibras recicladas e produziu-se um fio com 30 % de fibras de algodão recicladas e 70 % de algodão virgem. Posteriormente, optou-se por alterar o tipo de fibra virgem que estava a ser misturado com as fibras recicladas, de modo a facilitar a produção de um fio com o título pretendido. Assim, utilizando liocel, uma vez que é uma fibra mais resistente do que o algodão, produziu-se um fio com 50 % de fibras de algodão recicladas e 50 % de liocel virgem. Dado que foi possível obter o título de 30/1 com esta composição, tentou-se aumentar o teor de fibras recicladas para 70 %, misturando-as com apenas 30 % de liocel virgem.

Na Tabela 2 encontram-se apresentados, para cada um dos 4 fios produzidos, as gramagens das fitas estiradas obtidas, o número de fitas que se colocou na 2ª passagem no laminador, as gramagens das mechas produzidas, os parâmetros utilizados no contínuo de fiação para a produção de cada fio e, ainda, a estimativa obtida na fiação para o título do fio produzido. Tal como referido anteriormente, os títulos dos fios são posteriormente determinados segundo a norma em laboratório de acordo com a norma ISO 2060:1994.

Tabela 2. Parâmetros associados à produção dos 4 fios com fibras recicladas de algodão.

Composição do Fio		50 % CO reciclado / 50 % CO virgem	30 % CO reciclado / 70 % CO virgem	50 % CO reciclado / 50 % CLY virgem	70 % CO reciclado / 30 % CLY virgem
Fita Estirada [$\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$]		1,37	1,90	1,46	1,84
Nº de Fitas na 2ª Passagem no Laminador		4	3	3	2
Mecha [$\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$]		1,31	1,04	1,02	0,98
Parâmetros do Contínuo de Fiação	Estiragem	50	45	50	40
	Torção [$\text{voltas}\cdot\text{m}^{-1}$]	1000	900	870	950
	Pré-Estiragem	1,2	1,2	3,5	3,7
	Alimentação [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	5,4	6,0	6,2	5,7
Título [Ne] (valor obtido na fiação)		19/1	24/1	31/1	20/1

3.2.2 Fios com Fibras Recicladas Provenientes dos Tecidos

Posteriormente, realizou-se a produção de fios com a incorporação de fibras de algodão recicladas provenientes dos tecidos. Assim, optou-se por produzir fios com uma composição de 50 % de fibras recicladas e 50 % de fibras de algodão virgem, de modo a compará-los com os

obtidos anteriormente. Para isso, efetuou-se um processo de produção semelhante ao explicado anteriormente, mantendo as condições operacionais iguais. A cardação de 150 g de mistura de fibras recicladas com fibras de algodão virgem permitiu a obtenção de 4 fitas cardadas com $1,91 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$. Utilizou-se 4 fitas para a 2ª passagem no laminador e obteve-se uma mecha com uma gramagem média de $1,82 \text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$.

De seguida, optou-se pela produção de 2 fios, tendo-se utilizado no Fio 1 os mesmos parâmetros de fiação da produção do fio com a mesma composição, mas incorporando fibras recicladas provenientes das malhas. Por outro lado, para o Fio 2 tentou-se aproximar o seu título do pretendido no projeto, ou seja, um Ne 30/1. A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados no contínuo de fiação para cada um dos fios.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no contínuo de fiação para cada um dos fios produzidos.

	Estiragem	Torção [$\text{voltas}\cdot\text{m}^{-1}$]	Pré-Estiragem	Alimentação [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
FIO 1	50	1000	1,2	5,4
FIO 2	60	1100	1,2	4,9

3.3 Ensaios de Caracterização

De forma a caracterizar e avaliar as suas propriedades, tanto os fios produzidos como os produtos têxteis que foram reciclados mecanicamente e as respetivas fibras obtidas, foram enviados para os Laboratórios Certificados do CITEVE, para serem submetidos a diversos ensaios de caracterização.

É de salientar que todos estes ensaios se realizaram num ambiente condicionado, a uma temperatura de 20°C e um teor de humidade relativa de 65 %.

Relativamente às malhas 100 % algodão, correspondentes a restos de confeção, que foram utilizadas no processo de reciclagem mecânica, foram avaliadas as seguintes propriedades: o comprimento do fio retirado da malha, recorrendo à norma *European Standard*, EN 14970:2006; a torção de um fio da malha, utilizando a norma ISO 17202:2002; e, ainda, a massa linear, ou seja, o título de um fio retirado da malha, com a norma da *American Society for Testing and Materials*, ASTM D 1059.

Tanto para a determinação do título como do comprimento de um fio retirado das malhas, efetuaram-se 10 ensaios e utilizou-se uma tensão de $0,25 \text{ cN}\cdot\text{tex}^{-1}$. A Figura 11 apresenta fotografias dos equipamentos aos quais se recorreu para os ensaios do título do fio, uma régua e a balança analítica da *Sartorius*.



Figura 11. Fotografias dos equipamentos utilizados na determinação do título dos fios das malhas.

Os ensaios de torção realizaram-se num equipamento da *Zweigle*, modelo *D-314*, apresentado na Figura 12, tendo sido efetuados 16 ensaios, com uma tensão de $0,5 \text{ cN} \cdot \text{tex}^{-1}$.



Figura 12. Fotografia do equipamento da *Zweigle* utilizado para os ensaios de torção.

Determinou-se, ainda, de acordo com a norma EN 12127:1997, a massa por unidade de superfície da malha, ou seja, a gramagem da malha, em $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, sendo o valor obtido através da média dos 5 ensaios realizados. A Figura 13 apresenta fotografias dos equipamentos utilizados neste ensaio, o cortador de amostras da *Albrecht* e a balança de precisão da *METTLER PM480 DeltaRange®*.



Figura 13. Fotografias dos equipamentos utilizados na determinação da gramagem da malha.

Além disso, realizou-se ensaios de comprimento por medição fibra a fibra, tanto para as fibras das malhas 100 % algodão, como para as respetivas fibras de algodão obtidas através da reciclagem mecânica e para as fibras virgem de algodão utilizadas na produção dos fios. Recorreu-se à norma portuguesa NP 1874:1982, que possibilita a determinação do tamanho

médio e do tamanho modal de uma amostra de 500 fibras. Este teste de caracterização consiste num processo manual de medição do comprimento das fibras, em mm, realizado sobre uma placa de veludo preto, tal como se pode observar na Figura 14.



Figura 14. Fotografia de ensaio de determinação de comprimento por medição fibra a fibra.

Os fios produzidos com fibras recicladas foram caracterizados ao nível do seu título, ou seja, determinou-se a sua massa linear, recorrendo à norma ISO 2060:1994. Para isso, recorreu-se a uma jardeira da Zweigle, modelo L-232, apresentada na Figura 15, na qual se realizaram 3 ensaios com 10 metros de fio cada um.



Figura 15. Jardeira utilizada nos ensaios de determinação do título dos fios.

Avaliou-se, ainda, a resistência dos fios à rotura e o respetivo alongamento utilizando a norma ISO 2062:2009 e o equipamento STATIMAT M da Textechno. Nestes ensaios de tração realizaram-se 25 ensaios com 250 mm de fio e utilizou-se uma velocidade de $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, uma célula de carga de 10 N e uma pré-tensão de $0,5 \text{ cN} \cdot \text{tex}^{-1}$. Assim, é possível determinar a força de rotura, em cN, que consiste na força máxima sustentada pelo fio, a tenacidade, em RKM, que representa a razão entre a força de rutura e o título do fio e, ainda, a respetiva capacidade de alongamento do fio, em %, antes da rotura.

Por fim, procedeu-se ao estudo da regularidade de USTER e análise de imperfeições e pilosidade, tendo sido realizado de acordo com a norma ISO 16549:2021. Utilizou-se um equipamento de análise de uniformidades, o USTER® Tester 3, tendo-se definido uma velocidade de alimentação de $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Este ensaio de caracterização possibilita a determinação dos parâmetros de regularidade, U_m , do coeficiente de variação de massa, $C.V.m.$, e, ainda, o valor adimensional de pilosidade do fio. Além disso, permite realizar uma análise das imperfeições do fio, nomeadamente a presença de pontos finos (massa 50 % abaixo da média), pontos grossos (massa 50 % acima da média) e de neps (diâmetro 200 % acima da média). Devido à quantidade de fio disponível apenas foi possível efetuar 1 ensaio, com a duração de 1 minuto, sendo ainda de referir que não foi possível analisar o fio produzido com 70 % de fibras recicladas de algodão e 30 % de fibras de liocel, uma vez que a quantidade produzida não foi suficiente.

A Figura 16 apresenta fotografias dos equipamentos onde se realizaram os dois ensaios de caracterização descritos anteriormente, o *STATIMAT M* da *Textechno*, utilizado nos ensaios de tração, e o *USTER® Tester 3*, ao qual se recorreu para o estudo da regularidade e análise de imperfeições dos fios.



Figura 16. Fotografias do equipamento *STATIMAT M*, à esquerda, e do *USTER® Tester 3*, à direita.

3.4 Base de Dados *USTER® Statistics 2023*

Por fim, de modo a permitir uma análise mais adequada e comparação dos resultados obtidos na caracterização dos fios produzidos, recorreu-se à base de dados *USTER® Statistics 2023*. Esta é considerada uma norma de qualidade para a indústria têxtil, servindo de referência para diversas propriedades de fibras, fitas, mechas e fios e permitindo uma análise comparativa de qualidade dos mesmos (USTER, 2023).

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, nomeadamente ao nível da caracterização das malhas e dos tecidos utilizados na reciclagem mecânica, das respetivas fibras de algodão recicladas obtidas e, por fim, dos diferentes fios produzidos com mistura de fibras recicladas e fibras virgem.

4.1 Resíduos Têxteis de Malhas 100 % Algodão

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das malhas 100 % algodão, provenientes de restos de confeção, para os seguintes parâmetros: massa linear, comprimento médio e torção do fio que constitui a malha e, ainda, a massa por unidade de superfície, isto é, a gramagem da malha.

Tabela 4. Resultados obtidos na caracterização dos desperdícios têxteis de malhas 100 % algodão.

	MALHA BRANCA 100 % CO	MALHA CINZA 100 % CO
Título de fio da malha [Ne]	23,9	29,2
Comprimento de fio da malha [mm]	2,8	2,4
Torção de fio da malha [$V \cdot m^{-1}$]	686 Z	731 Z
Gramagem da malha [$g \cdot m^{-2}$]	188	168

Analisando a tabela anterior, é possível verificar que as malhas apresentam propriedades semelhantes, nomeadamente ao nível da gramagem e do comprimento médio e torção dos fios que as constituem.

Relativamente ao comprimento das fibras das malhas, obteve-se um comprimento médio de $25,1 \pm 5,4$ mm para a malha branca e de $24,8 \pm 5,6$ mm para a cinza. A Figura 17 e a Figura 18 apresentam os histogramas referentes aos ensaios de caracterização para determinação do comprimento das fibras das malhas branca e cinza, respetivamente.

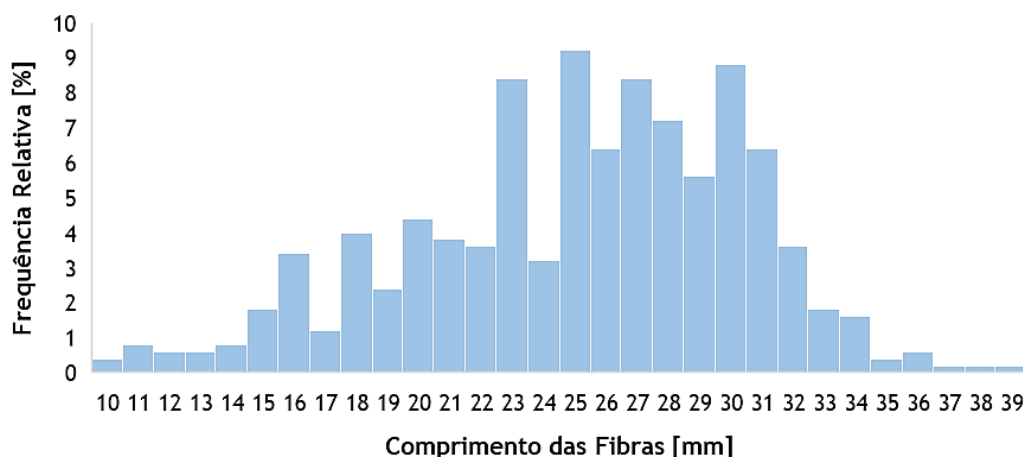


Figura 17. Distribuição de comprimentos das fibras da malha branca 100 % algodão.

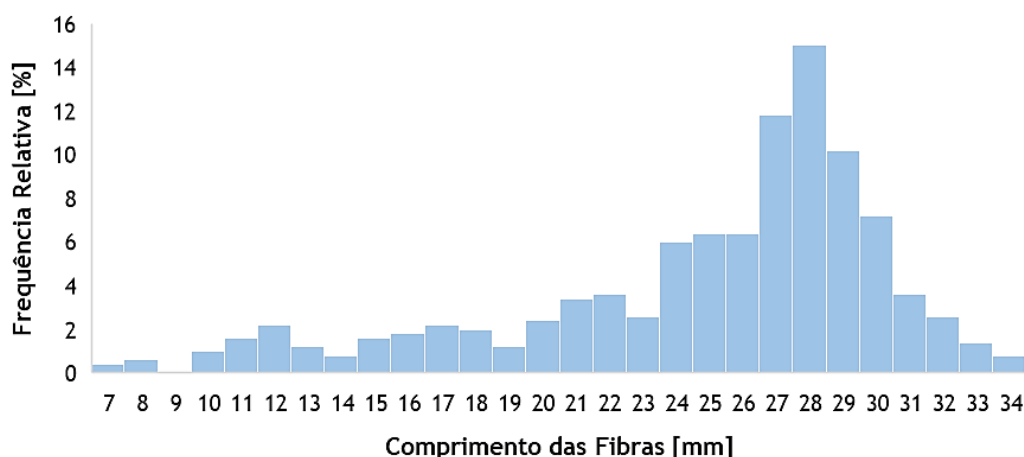


Figura 18. Distribuição de comprimentos das fibras da malha cinza 100 % algodão.

Observando os histogramas apresentados é possível verificar que o comprimento modal das fibras da malha branca é de 25 mm, enquanto para as fibras da malha cinza é igual a 28 mm. Além disso, observa-se que as fibras da malha branca apresentam uma maior dispersão de comprimentos do que as da malha cinza, sendo que esta última apresenta maioritariamente fibras com comprimentos entre 24 e 30 mm.

4.2 Fibras de Algodão Reciclad

Relativamente à rama de fibras mescla obtida por reciclagem mecânica das malhas 100 % algodão, obteve-se um comprimento médio de $19,7 \pm 6,5$ mm e um comprimento modal de 16 mm. É possível verificar, tal como seria expectável, que estes valores são inferiores aos obtidos para as fibras das malhas, uma vez que o processo de reciclagem mecânica pode provocar a redução significativa do tamanho das fibras (Määttänen, 2023).

A Figura 19 apresenta o histograma de distribuição do comprimento destas fibras recicladas.

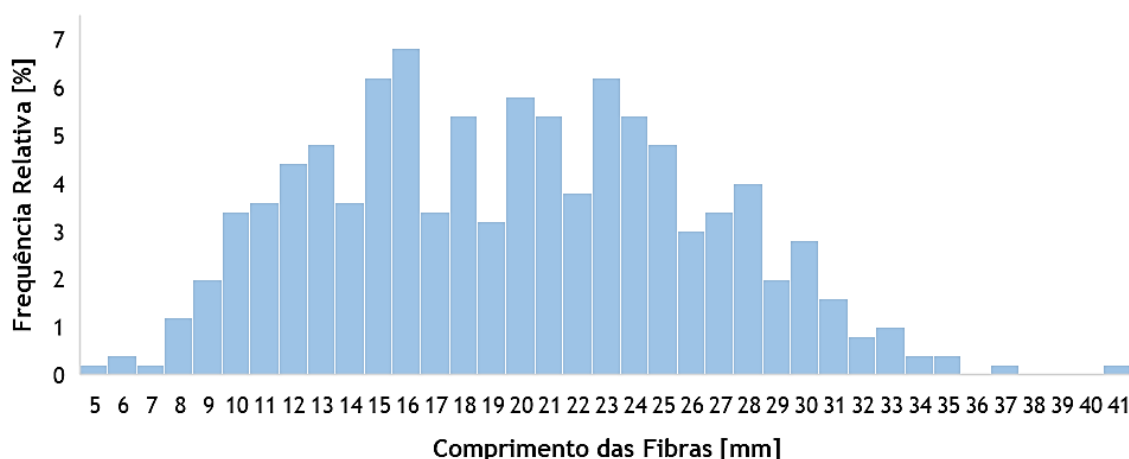


Figura 19. Distribuição de comprimentos das fibras recicladas provenientes das malhas.

Através da análise da figura anterior, é possível verificar a elevada dispersão dos comprimentos destas fibras, apresentando comprimentos entre 8 e 35 mm. Segundo Arafat & Uddin (2022), é expectável a existência de uma gama de fibras curtas (menores de 25 mm), médias (entre 25 e 30 mm) e longas (entre 30 e 35 mm) numa gama de fibras recicladas, devido aos processos de corte e desfibração associados à reciclagem mecânica.

Adicionalmente, realizou-se a caracterização das fibras virgem de algodão, tendo-se obtido um comprimento médio de $24,3 \pm 6,0$ mm e um comprimento modal de 28 mm.

Na Figura 20 encontra-se apresentado um diagrama de extremos e quartis relativo aos comprimentos das fibras, nomeadamente das duas malhas 100 % algodão, das respetivas fibras recicladas obtidas e das fibras virgem de algodão.

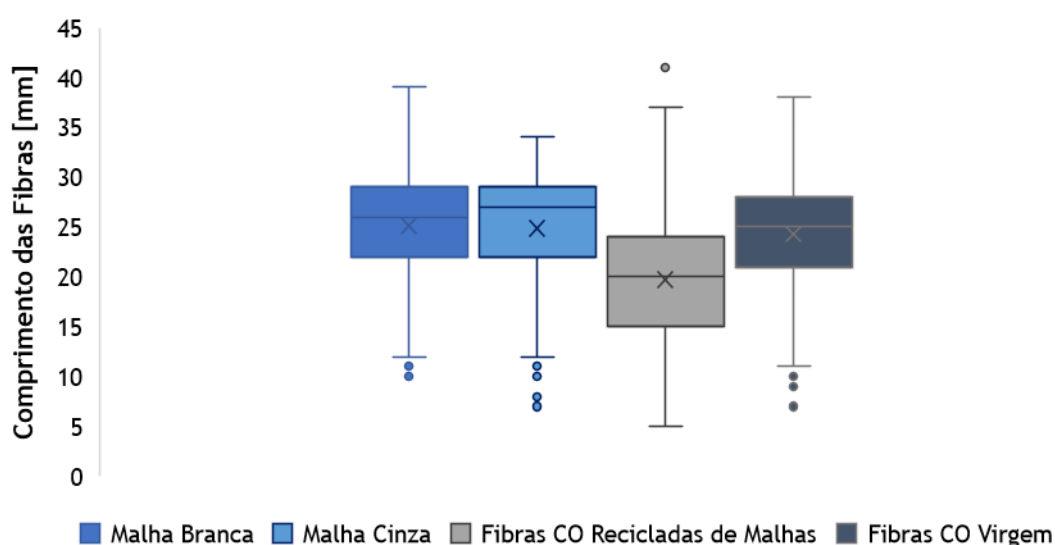


Figura 20. Comparação das distribuições de comprimento das fibras das malhas com as fibras recicladas obtidas e as fibras de algodão virgem.

Analisando o diagrama de extremos e quartis apresentado, observa-se que as distribuições de comprimentos de fibras de ambas as malhas são semelhantes. Contudo, comparando a distribuição obtida para as fibras recicladas com as das malhas e das fibras virgem de algodão, constata-se que o comprimento médio das fibras recicladas é inferior e que a distribuição dos seus comprimentos se encontra maioritariamente na gama das fibras curtas, enquanto nos restantes prevalece a existência de fibras médias, observando-se apenas a presença de alguns *outliers* para comprimentos muito reduzidos. Além disso, verifica-se que a amplitude interquartil, uma medida de dispersão dos comprimentos das fibras, aumenta de 7 nas malhas e nas fibras virgem para 9 na gama de fibras recicladas que apresenta uma gama de comprimentos bastante maior. Assim, tal como Arafat & Uddin (2022) concluíram nos seus estudos, verifica-se que o processo de reciclagem mecânica diminui consideravelmente o tamanho das fibras e aumenta a dispersão dos seus comprimentos. Por fim, de acordo com Ichim & Sava (2022), as fibras virgem de algodão são mais longas e apresentam uma menor

dispersão de comprimentos do que as fibras recicladas, o que pode ser observado no diagrama anterior.

4.3 Resíduos Têxteis de Tecidos 100 % Algodão

A Figura 21 apresenta uma fotografia dos três tecidos 100 % algodão utilizados para a obtenção de fibras recicladas mecanicamente.



Figura 21. Fotografia dos três tecidos 100 % algodão.

A Tabela 5 apresenta os valores dos diversos parâmetros de caracterização para os três tecidos.

Tabela 5. Resultados obtidos na caracterização dos tecidos 100 % algodão.

	TECIDO A	TECIDO B	TECIDO C
Título de fio do tecido [Ne]	60,2	60,7	61,3
Torção de fio do tecido [$V \cdot m^{-1}$]	1269 Z	1319 Z	1369 Z
Gramagem do tecido [$g \cdot m^{-2}$]	83,9	85,3	96,5

É possível observar que os três tecidos apresentam propriedades bastante semelhantes ao nível da gramagem e, ainda, do título e torção dos seus fios. É de referir que os tecidos apresentam fios mais finos, com maior torção e uma gramagem inferior à das malhas.

No estudo dos comprimentos das fibras dos tecidos, obteve-se um comprimento médio para o tecido A de $26,2 \pm 7,3$ mm, para o tecido B de $26,4 \pm 7,3$ mm e $28,1 \pm 7,6$ mm para o tecido C e, ainda um comprimento modal de 32, 30 e 28 mm para os tecidos A, B e C, respetivamente, observando-se novamente uma similaridade entre os três.

A Figura 22, a Figura 23 e a Figura 24 apresentam os histogramas referentes à distribuição de comprimentos das fibras dos três tecidos 100 % algodão em estudo.

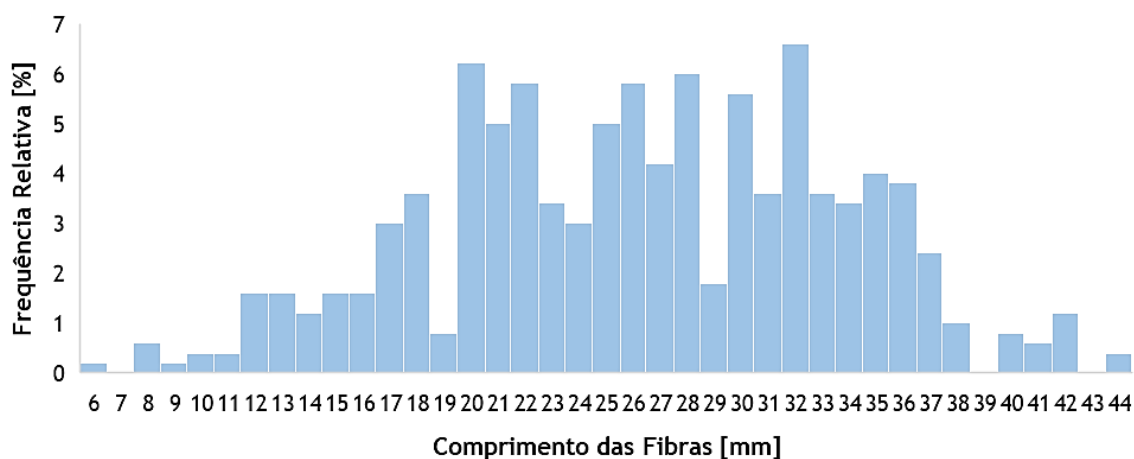


Figura 22. Distribuição de comprimentos das fibras do tecido A.

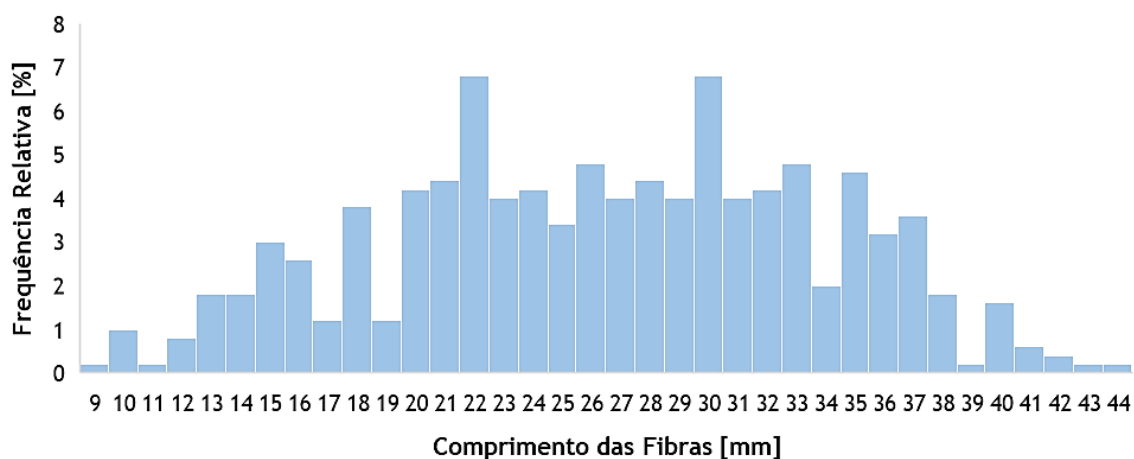


Figura 23. Distribuição de comprimentos das fibras do tecido B.

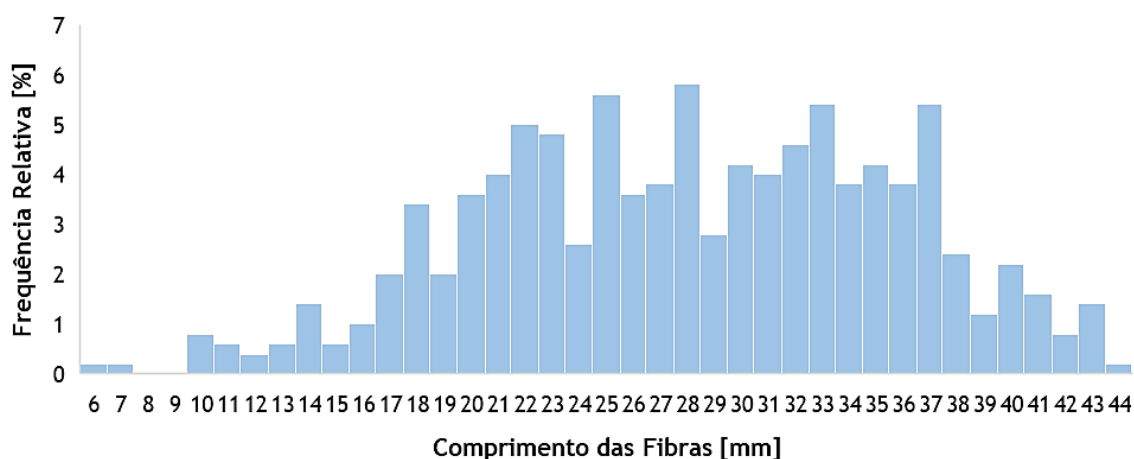


Figura 24. Distribuição de comprimentos das fibras do tecido C.

Analisando os histogramas anteriores, observa-se novamente a semelhança entre os três tecidos utilizados, sendo estes caracterizados por uma elevada dispersão de comprimentos das fibras.

4.4 Fibras de Algodão Recicladas de Tecidos

Tal como para as fibras recicladas obtidas das malhas, caracterizou-se a rama multicolor de fibras de algodão provenientes dos tecidos 100 % algodão, obtendo-se um comprimento médio de $23,4 \pm 7,2$ mm e um comprimento modal de 21 mm. A Figura 25 apresenta o histograma de distribuição do comprimento destas fibras recicladas.

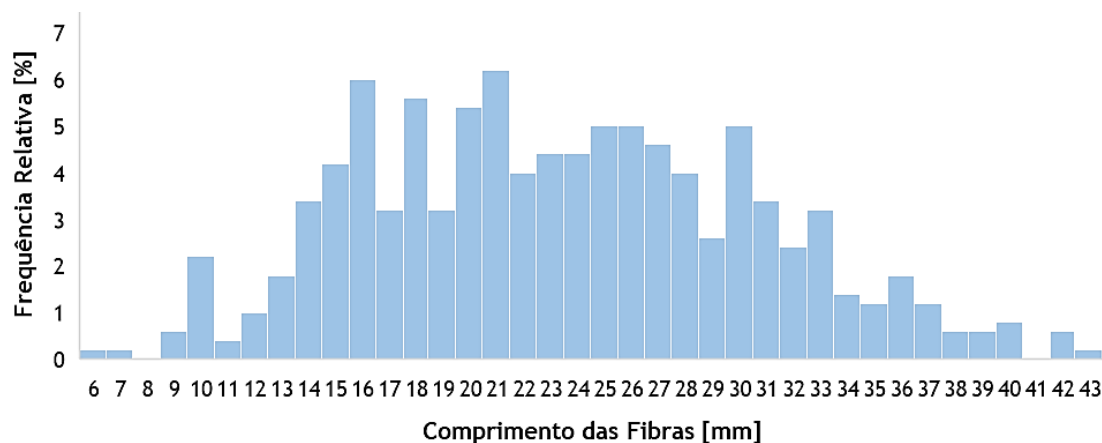


Figura 25. Distribuição de comprimentos das fibras recicladas provenientes dos tecidos.

Tal como se constatou para as fibras recicladas provenientes das malhas, o comprimento médio destas fibras recicladas é inferior aos das fibras dos tecidos e observa-se que a rama reciclada apresenta uma vasta gama de fibras com comprimentos entre 10 e 37 mm. Assim, comprova-se a elevada dispersão característica de uma rama de fibras recicladas e a diminuição do comprimento das fibras causada pela reciclagem mecânica (Malinverno et al., 2023).

Na Figura 26 encontra-se apresentado um diagrama de extremos e quartis que permite a comparação da distribuição de comprimento das fibras dos três tecidos 100 % algodão, das fibras recicladas obtidas e, ainda, das fibras de algodão virgem.

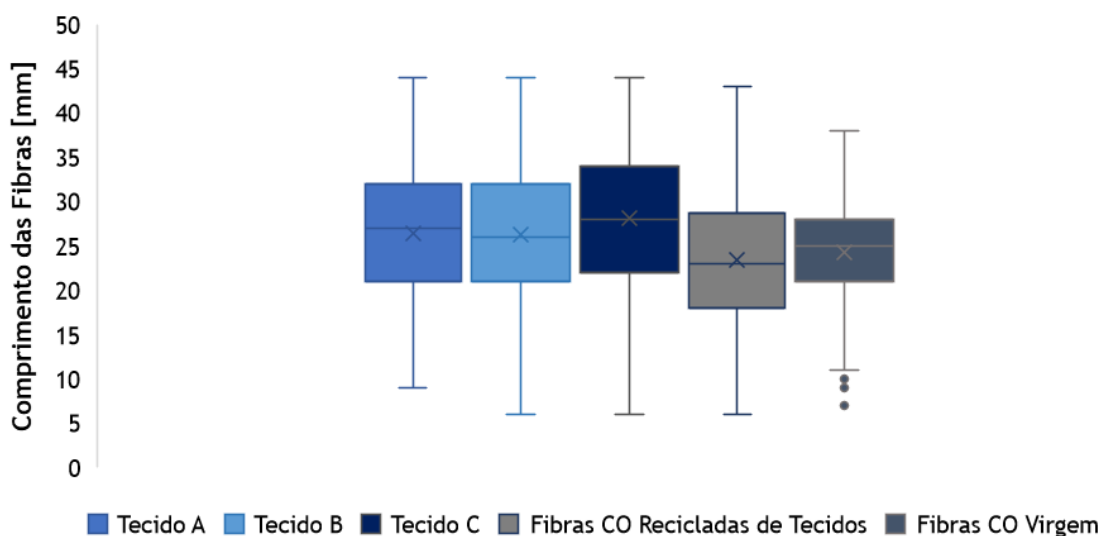


Figura 26. Comparação das distribuições de comprimento das fibras dos tecidos com as fibras recicladas obtidas e as fibras de algodão virgem.

Através da análise do gráfico anterior, constata-se que as distribuições de comprimentos das fibras dos tecidos e das fibras recicladas apresentam dispersões semelhantes, associadas a uma amplitude interquartil de aproximadamente 11. Verifica-se, ainda, a diminuição do comprimento médio das fibras recicladas, resultante das ações mecânicas aplicadas durante os processos de corte e desfibração da reciclagem têxtil (Arafat & Uddin, 2022).

Comparação das Ramas de Fibras Recicladas Obtidas

Realizando agora uma comparação entre as duas ramas de fibras de algodão recicladas, verifica-se que os comprimentos médios não apresentam diferenças significativas, sendo $19,7 \pm 6,5$ mm para as fibras provenientes das malhas e $23,4 \pm 7,2$ mm para as provenientes dos tecidos. Em relação à dispersão dos tamanhos das fibras, as fibras recicladas através dos tecidos apresentam uma gama de comprimentos maior, associada a uma amplitude interquartil igual a 11, em relação à amplitude de 7 referente à rama reciclada das malhas.

4.5 Caracterização dos Fios

4.5.1 Fios com Fibras Recicladas Provenientes das Malhas

Relativamente à caracterização dos fios produzidos com a mistura de fibras de algodão recicladas das malhas e fibras virgem de algodão e de liocel, determinou-se a sua massa linear. A Tabela 6 apresenta os valores médios obtidos neste ensaio de caracterização.

Tabela 6. Resultados obtidos na determinação do título dos fios.

	FIO 50 % CO RECICLADO / 50 % CO VIRGEM	FIO 30 % CO RECICLADO / 70 % CO VIRGEM	FIO 50 % CO RECICLADO / 50 % CLY VIRGEM	FIO 70 % CO RECICLADO / 30 % CLY VIRGEM
Título [Ne]	20,2	22,8	26,1	19,4

Tal como foi explicitado anteriormente na Secção 1.1, o objetivo deste projeto é a produção de fios com um título de Ne 30/1 com a incorporação de, pelo menos, 50 % de fibras de base celulósica recicladas. Relativamente ao título dos fios produzidos, apesar do esforço de tentar aproximá-los o máximo possível do pretendido, não foi possível obter nenhum fio com Ne 30/1.

De acordo com várias investigações nesta área, a incorporação de fibras recicladas em fios afeta a qualidade do fio produzido, uma vez que o comprimento destas fibras, nomeadamente a presença notável de fibras curtas, influencia significativamente a eficiência do processo de fiação (Candido, 2021; Kering & Textile Exchange, 2021). Assim, quanto maior for o teor de fibras recicladas, mais complicado é a obtenção de fios mais finos, com qualidade para as próximas etapas de produção de um têxtil (Yilmaz et al., 2017). Ambos os fios 100 % algodão apresentam títulos próximos de Ne 20/1, contudo foi possível atingir um título um pouco superior reduzindo 20 % do conteúdo de fibras recicladas.

Quanto aos fios produzidos com fibra de liocel virgem com o teor de 50 % de fibras recicladas, obteve-se um título Ne 26/1, superior aos obtidos nos fios 100 % algodão. Verificou-se que a substituição das fibras de algodão virgem por fibras virgem de liocel possibilitou a produção de fios com títulos superiores, dado que estas fibras são bastante mais resistentes que o algodão, contribuindo para uma melhor fiação das fibras recicladas. Além disso, foi possível incorporar um teor de 70 % de fibras recicladas, produzindo-se um fio com 30 % de liocel virgem e 70 % de algodão reciclado com um título próximo ao obtido no fio com 50 % de fibras de algodão virgem e 50 % de fibras de algodão reciclado.

É ainda de salientar que a dificuldade de obtenção de fios com o título pretendido pode estar associada ao método de fiação utilizado, dado que se tratam de fios produzidos através da tecnologia de fiação de anel e, de acordo com a literatura (Baykal & Babaarslan, 2003; Fibre2Fashion, 2023; Yilmaz et al., 2017), a fiação *open-end* apresenta melhores resultados na incorporação de fibras recicladas, uma vez que é uma tecnologia mais adequada para a fiação de fibras mais curtas. Além disso, o facto das fibras de algodão recicladas terem sido obtidas a partir de retalhos de malhas bastante pequenos provenientes de restos de confeção pode afetar significativamente as propriedades das fibras obtidas, nomeadamente o seu comprimento, influenciando a qualidade do fio produzido (Arafat & Uddin, 2022).

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração realizados para análise da resistência dos fios à rotura e determinação do respetivo alongamento e da tenacidade dos mesmos.

Tabela 7. Resultados obtidos nos ensaios de resistência dos fios à rotura.

	FIO 50 % CO RECICLADO / 50 % CO VIRGEM	FIO 30 % CO RECICLADO / 70 % CO VIRGEM	FIO 50 % CO RECICLADO / 50 % CLY VIRGEM	FIO 70 % CO RECICLADO / 30 % CLY VIRGEM
Alongamento [%]	5,0 ± 1,3	5,5 ± 1,0	6,9 ± 0,9	5,3 ± 1,0
Força de Rotura [cN]	219 ± 77	237 ± 60	299 ± 76	214 ± 83
Tenacidade [RKM]	7,7	9,3	13,5	7,2

Analisando a tabela anterior, é possível observar que ambos os fios 100 % algodão apresentam valores semelhantes de alongamento e força de rotura. Esta conclusão está de acordo com os estudos realizados por Yilmaz et al. (2017), nos quais defende que o aumento do teor de fibras recicladas não provoca grandes alterações nos valores de alongamento. Contudo, as propriedades mecânicas do fio com apenas 30 % de fibras de algodão reciclado e 70 % de algodão virgem são ligeiramente melhores, ou seja, apresenta valores de força de rotura e tenacidade superiores. Segundo Ichim & Sava (2022) é expectável que a diminuição do teor de fibras recicladas permita não só a obtenção de um fio com um título Ne superior, mas também com melhor resistência à tração, o que foi verificado.

A substituição das fibras de algodão virgem na produção do fio com 50 % de algodão reciclado e 50 % de liocel virgem originou um aumento considerável, praticamente o dobro, da resistência do fio. Por fim, o fio com 70 % de algodão reciclado e 30 % de liocel apresenta uma resistência equiparável aos fios 100 % algodão, uma vez que as fibras mais resistentes de liocel provavelmente compensam o efeito do elevado teor de fibras recicladas na diminuição das propriedades mecânicas do fio.

Posteriormente, procedeu-se ao estudo de USTER® da regularidade dos fios, através do qual se determinou a regularidade média, U_m , o coeficiente de variação de massa, $C.V.m.$, e a pilosidade dos fios. Realizou-se, ainda, uma análise das imperfeições dos fios, avaliando a presença de pontos finos (- 50 %), pontos grossos (+ 50 %) e neps (+ 200 %). A Tabela 8 apresenta os valores para três dos fios produzidos, uma vez que, tal como já foi mencionado anteriormente, não foi possível realizar estes ensaios de caracterização no fio com 70 % de algodão reciclado e 30 % de liocel virgem. É de salientar que a análise dos resultados obtidos é limitada pelo facto de apenas ter sido possível analisar 400 metros de fio, em vez dos 1000 metros que normalmente se analisam nestes ensaios de regularidade.

Tabela 8. Resultados obtidos na análise de regularidade e de imperfeições dos fios.

		FIO 50 % CO RECICLADO / 50 % CO VIRGEM	FIO 30 % CO RECICLADO / 70 % CO VIRGEM	FIO 50 % CO RECICLADO / 50 % CLY VIRGEM
U_m [%]		33,1	31,2	29,2
$C.V.m.$ [%]		41,0	39,5	36,6
Pilosidade		8,2 ± 3,6	7,2 ± 2,9	6,7 ± 2,8
Indicadores de Imperfeições [km ⁻¹]	Pontos Finos	8158	5880	4118
	Pontos Grossos	5890	3902	3472
	Neps	4528	3508	4885

Através da tabela anterior, é possível concluir que, ao nível da regularidade, os três fios em estudo são semelhantes, dado que todos apresentam valores de U_m próximos de 30 % e valores de $C.V.m.$ próximos de 40 %. É de referir que este último parâmetro é uma medida da irregularidade do fio, pelo que os seus valores elevados refletem a qualidade e a elevada irregularidade dos fios produzidos. De acordo com Ichim & Sava (2022), a incorporação de fibras recicladas nos fios aumenta consideravelmente a irregularidade dos mesmos, devido ao carácter não uniforme e aos comprimentos bastante curtos das fibras recicladas. Além disso, os fios foram produzidos numa linha de fiação à escala piloto, o que pode afetar a qualidade dos fios.

Em relação à pilosidade, verifica-se que, considerando os desvios-padrão associados, os valores obtidos são idênticos para os três fios. Assim, ao contrário do apresentado na literatura (Faysal

et al., 2022), é possível aferir que este parâmetro não foi afetado pelo aumento do teor de fibras recicladas. É possível observar que o fio com 50 % de algodão reciclado e 50 % de algodão virgem é o que apresenta mais imperfeições, possuindo o maior número de pontos finos e de pontos grossos por quilômetro de fio.

É de salientar que os valores baixos associados à regularidade média e valores elevados dos restantes parâmetros apresentados na tabela são expectáveis em fios com a incorporação de fibras recicladas, dado que a elevada quantidade de fibras curtas origina a produção de fios mais irregulares, com um elevado *C.V.m.* e com mais imperfeições (Arafat & Uddin, 2022). Além disso, a fiação de anel de misturas com fibras recicladas também contribui para a obtenção de fios mais irregulares e muitas imperfeições resultantes da dificuldade de fiação de fibras recicladas (Yilmaz et al., 2017).

4.5.2 Fios com Fibras Recicladas Provenientes dos Tecidos

Posteriormente, caracterizou-se os dois fios produzidos com a incorporação de 50 % de fibras de algodão recicladas de tecidos e 50 % de algodão virgem. É de salientar que o Fio 1 foi produzido com os mesmos parâmetros de fiação do fio com a mesma composição com fibras recicladas das malhas, de forma a permitir a comparação das fibras recicladas provenientes de malhas e de tecidos. Por outro lado, a fiação do Fio 2 foi realizada de modo a tentar cumprir o objetivo do projeto, ou seja, aproximar o título do fio o máximo possível de Ne 30/1.

A Tabela 9 apresenta não só os valores médios obtidos para a massa linear de ambos os fios, mas também os resultados obtidos na caracterização relativamente à sua resistência à rotura.

Tabela 9. Resultados da determinação do título e dos ensaios de resistência dos fios à rotura.

	FIO 1	FIO 2
Título [Ne]	14,7	20,2
Alongamento [%]	5,7 ± 0,9	4,8 ± 1,0
Força de Rotura [cN]	271 ± 53	194 ± 49
Tenacidade [RKM]	6,9	6,7

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o fio mais fino, Fio 2, apresenta valores de alongamento e força de rotura inferiores. Segundo Ichim & Sava (2022), à medida que o valor de Ne aumenta, ou seja, os fios se tornam mais finos, o alongamento e a força de rotura diminuem devido ao menor número de fibras na secção transversal do fio.

Comparando o Fio 1 com o fio produzido anteriormente com a mesma composição, constata-se que, utilizando os mesmos parâmetros de fiação, não foi possível produzir um fio tão fino, com um título próximo de Ne 20/1. Além disso, as propriedades mecânicas de ambos os fios são

semelhantes, exceto a tenacidade que é superior para o fio com fibras recicladas das malhas. Uma vez que as propriedades de um fio dependem, essencialmente, das fibras que o constituem e do processo de produção (Alagirusamy & Das, 2015) e dado que se utilizou um processo de produção idêntico para ambos os fios, é possível aferir que as alterações nas propriedades do fio são provocadas pela qualidade das fibras recicladas dos tecidos. Assim, é possível concluir que a presença de uma quantidade considerável de fios e ainda alguns retalhos de tecidos na rama reciclada afetaram significativamente a eficiência do processo de fiação e, consequentemente, a qualidade do fio obtido, sendo de salientar que Ichim & Sava (2022) e Candido (2021) constataram o mesmo nos seus estudos.

A Tabela 10 apresenta os resultados do estudo da regularidade de *USTER*[®] e da análise de imperfeições dos fios, sendo de salientar que apenas foi possível realizar este ensaio de caracterização para o Fio 2.

Tabela 10. Resultados obtidos na análise de regularidade e imperfeições do Fio 2.

		FIO 2
U_m [%]		34,3
C.V.m. [%]		42,2
Pilosidade		6,4 ± 2,9
Indicadores de Imperfeições [km ⁻¹]	Pontos Finos	9010
	Pontos Grossos	6380
	Neps	7230

É possível constatar que os valores obtidos para este fio são semelhantes aos obtidos anteriormente para os fios com fibras recicladas das malhas, nomeadamente regularidades baixas e C.V.m. elevados, característicos de fios produzidos com a incorporação de fibras recicladas através da fiação de anel (Arafat & Uddin, 2022). Relativamente aos indicadores de imperfeições, o Fio 2 apresenta um maior número de pontos grossos, finos e neps que os outros fios, comprovando a grande presença de imperfeições no fio. Isto deve-se essencialmente ao caráter não uniforme da rama de fibras recicladas provenientes dos tecidos.

4.5.3 Comparação com *USTER*[®] Statistics 2023

Por fim, recorreu-se à base de dados *USTER*[®] Statistics 2023 para comparar os resultados obtidos na caracterização dos diferentes fios produzidos. Assim, foi possível obter valores de referência para as propriedades de um fio 100 % algodão e, ainda, para um fio com 30 % de fibras de algodão reciclado e 70 % algodão virgem.

A Tabela 11 apresenta os valores, obtidos na base de dados, para as propriedades mecânicas de alongamento, força de rotura e tenacidade dos fios, propriedades associadas a ensaios da regularidade, como o *C.V.m.* e a pilosidade, e, ainda, indicadores de imperfeições.

Tabela 11. Parâmetros de caracterização de fios obtidos na base de dados USTER® Statistics 2023.

		FIO 100 % CO	FIO 30 % CO RECICLADO / 70 % CO VIRGEM
Alongamento de Rotura [%]		4,4	4,0
Força de Rotura [cN]		455	338
Tenacidade [RKM]		15,6	13,5
<i>C.V.m.</i> [%]		16,4	20,3
Pilosidade		9,0	9,7
Indicadores de Imperfeições [km ⁻¹]	Pontos Finos	36	151
	Pontos Grossos	351	975
	Neps	550	989

Primeiramente, comparando os valores apresentados na tabela anterior com os apresentados na Tabela 7, na Tabela 8 e na Tabela 9 para os fios 100 % algodão produzidos, verifica-se que tanto a força de rotura como a tenacidade dos fios produzidos são significativamente mais baixas. Contudo, os alongamentos de rotura obtidos foram semelhantes ao apresentado na base de dados. Assim, a resistência dos fios produzidos é inferior ao fio 100 % algodão de referência, essencialmente devido à incorporação de fibras recicladas na sua composição (Yilmaz et al., 2017). Segundo Faysal et al. (2022), quando um fio é submetido a um ensaio de tração, as fibras curtas, características de uma rama de fibras recicladas, são mais propensas a deslizar e causar a rotura do fio, originando valores mais baixos de tenacidade.

Analisando os *C.V.m.* e os três indicadores de imperfeições, conclui-se que os fios produzidos são bastante irregulares e apresentam um número elevado de imperfeições, dado que apresentam valores bastante superiores para estes parâmetros. Tal como já foi mencionado anteriormente, a irregularidade e imperfeições nos fios são provocadas pela incorporação de fibras recicladas, nomeadamente pela grande quantidade de fibras curtas (Arafat & Uddin, 2022), e, ainda, pelo processo de fiação de anel que, em comparação com a fiação *open-end*, origina fios mais irregulares (Yilmaz et al., 2017). Além disso, o facto dos fios terem sido produzidos numa linha piloto, com algumas diferenças relativamente às linhas de produção industriais, pode afetar significativamente a qualidade e uniformização dos fios obtidos e, conseqüentemente, as suas propriedades. Finalmente, observa-se que os fios produzidos apresentam valores de pilosidade em concordância com os apresentados na base de dados, pelo

que a diminuição do comprimento médio das fibras na reciclagem mecânica não teve um impacto significativo neste parâmetro.

Analisando os valores obtidos através da *USTER® Statistics 2023* e os apresentados anteriormente, Tabela 7 e Tabela 8, para um fio com 30 % de algodão reciclado e 70 % de algodão virgem, verifica-se que a tenacidade de 9,3 RKM do fio produzido é inferior ao valor de 13,5 RKM apresentado na base de dados. Isto deve-se essencialmente à presença notável de fibras curtas na rama reciclada, o que influencia as forças de coesão entre as fibras, diminuindo assim a tenacidade do fio (Faysal et al., 2022). Além disso, dado que as fibras recicladas são bastante menores do que as fibras virgem de algodão, entrelaçam-se menos vezes e, por isso, não contribuem tanto para a resistência e tenacidade do fio (Ichim & Sava, 2022). Contudo, os outros parâmetros associados à resistência do fio, $5,5 \pm 1,0$ % para o alongamento e 237 ± 60 cN para a força de rotura, encontram-se próximos dos valores expectáveis.

Relativamente ao *C.V.m.*, o valor apresentado na base de dados para o fio com fibras recicladas é ligeiramente superior ao do fio 100 % algodão, contudo o valor obtido para o fio produzido é ainda mais elevado e bastante próximo de 40 %. Adicionalmente, o número de pontos finos, pontos grossos e neps do fio produzido também é bastante superior aos da base de dados, comprovando a irregularidade e presença de imperfeições neste fio. Através da literatura (Arafat & Uddin, 2022; Yilmaz et al., 2017), é possível concluir que o processo de fiação de anel e a incorporação de fibras recicladas, principalmente com comprimentos bastante curtos, afetam significativamente estes parâmetros. Contudo é de salientar que não foi analisada uma amostra representativa deste fio nos ensaios de regularidade, o que pode limitar a análise destes parâmetros.

5 Conclusões

A indústria têxtil é um dos setores responsáveis por uma elevada quantidade de resíduos, sendo fundamental o desenvolvimento de sistemas de gestão de resíduos mais sustentáveis relativamente à incineração ou deposição em aterros. A reciclagem têxtil, nomeadamente a reciclagem mecânica, é a alternativa mais sustentável e que promove a economia circular neste setor. Assim, é necessário o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento, de modo a torná-la economicamente rentável e aumentar a sua implementação.

Primeiramente, verificou-se que a reciclagem mecânica, nomeadamente os processos de corte e desfibrção, diminuem significativamente o tamanho das fibras têxteis e aumentam a dispersão dos seus comprimentos. Além disso, observa-se uma presença notável de fibras curtas nas ramas de fibras recicladas produzidas.

Comparando as fibras recicladas provenientes das malhas e dos tecidos 100 % algodão, estas não apresentaram diferenças significativas ao nível dos seus comprimentos. Contudo, é de referir que a rama reciclada dos tecidos apresentava uma maior quantidade de fios e retalhos de tecidos na sua composição, o que afeta a qualidade dos fios produzidos.

De seguida, a caracterização dos fios produzidos com mistura de fibras de algodão recicladas e fibras virgem de algodão e de liocel permitiu retirar algumas conclusões, que se encontram de acordo com a literatura.

Constatou-se que a qualidade do fio é afetada pela incorporação de fibras recicladas, dado que o elevado número de fibras curtas influencia a eficiência do processo de fiação. Assim, quanto maior o teor de fibras recicladas, mais complicado é a obtenção de fios mais finos e com qualidade para a produção de estruturas têxteis. Verificou-se, ainda, que a substituição das fibras de algodão virgem por fibras virgem de liocel, que são bastante mais resistentes, possibilitou a produção de fios com títulos superiores.

Assim, apesar da produção de fios com teores de fibras de algodão recicladas de 50 % ou até superiores, não foi possível a obtenção de um fio com o título Ne 30/1, como pretendido para o projeto Be@t. Esta dificuldade encontra-se provavelmente associada à utilização da fiação de anel, uma vez que, de acordo com a literatura, a fiação *open-end* apresenta melhores resultados na incorporação de fibras recicladas.

Observou-se, ainda, que o aumento do teor de fibras recicladas, apesar de não provocar alterações significativas ao nível do alongamento, afeta as propriedades mecânicas do fio, diminuindo a sua resistência. Adicionalmente, a substituição das fibras de algodão virgem por liocel virgem provocaram um aumento considerável da resistência do fio.

Em relação ao estudo da regularidade dos fios, verificou-se que todos os fios apresentavam valores de regularidade média próximos de 30 % e de coeficiente de variação de massa próximos de 40 %. Assim, a incorporação de fibras recicladas nos fios, devido ao seu carácter não uniforme e comprimentos bastante curtos, aumenta consideravelmente a irregularidade e a presença de imperfeições nos fios.

Salienta-se, ainda, que as propriedades dos fios podem ter sido afetadas pela utilização da fiação de anel que, em comparação com a fiação *open-end*, origina fios mais irregulares e pelo facto de terem sido produzidos numa linha de produção piloto.

Por fim, comparando os fios produzidos com os valores apresentados na *USTER® Statistics 2023* para um fio 100 % algodão, constatou-se que a incorporação de fibras recicladas, principalmente fibras curtas, diminui consideravelmente a resistência do fio, nomeadamente a sua força de rotura e tenacidade, e aumenta significativamente a irregularidade e presença de imperfeições nos fios.

Contudo, comparando com os valores da base de dados para um fio com 30 % de algodão reciclado e 70 % de algodão virgem, verifica-se que os parâmetros associados à resistência do fio se encontram próximos dos valores expectáveis.

Em suma, o trabalho desenvolvido foi fundamental para a análise do efeito da incorporação de fibras de algodão, obtidas através da reciclagem mecânica de resíduos têxteis, nas propriedades e qualidade de um fio produzido através da fiação de anel com mistura de fibras recicladas e fibras virgem de algodão e liocel.

6 Avaliação do Trabalho Realizado

6.1 Objetivos Cumpridos

Esta dissertação enquadra-se no projeto Be@t - Bioeconomia Têxtil e Vestuário, cujo objetivo principal é a produção de fios com, pelo menos, 50 % de fibras recicladas de base celulósica com um título Ne 30/1. Assim, apesar do sucesso na obtenção de fibras recicladas de base celulósica através da reciclagem mecânica de resíduos têxteis 100 % algodão e da sua, posterior, incorporação em fios cardados com teores de fibras recicladas iguais ou até superiores a 50 %, não foi possível a fiação de um fio com um título Ne 30/1.

Contudo, é de salientar a produção e caracterização de seis fios diferentes com mistura de fibras recicladas e fibras virgem, tanto de algodão como liocel, utilizando dois tipos de fibras de algodão recicladas obtidas através reciclagem mecânica de malhas e tecidos.

6.2 Limitações e Trabalhos Futuros

A principal limitação deste projeto encontra-se associada à disponibilidade da linha piloto de reciclagem mecânica e fiação do CITEVE, dado que limitou a parte experimental realizada, nomeadamente ao nível da quantidade de fios produzidos e da reciclagem de diferentes resíduos têxteis.

Relativamente a trabalhos futuros, deve realizar-se a reciclagem mecânica de outros resíduos têxteis, constituídos por outras fibras além do algodão, de modo a avaliar a sua eficiência, tanto na obtenção de fibras recicladas como na sua posterior incorporação em fios.

Além disso, deve otimizar-se o processo de reciclagem mecânica, avaliando o efeito das condições operacionais, nomeadamente o tamanho selecionado na máquina de corte e as velocidades da desfibradora, na qualidade das fibras recicladas obtidas.

Por fim, deveriam ser produzidos mais fios, com diferentes teores de fibras recicladas, de modo a permitir uma melhor análise dos parâmetros de caracterização obtidos e avaliação do efeito da incorporação de fibras recicladas na qualidade do fio produzido.

6.3 Apreciação Final

Apesar de todos os desafios com os quais me deparei ao longo da realização desta dissertação, foi um privilégio realizar a minha dissertação em ambiente empresarial na área da indústria têxtil. Foi, sem dúvida, um processo desafiante, por vezes, desmotivador, mas sobretudo enriquecedor que contribuiu significativamente para o meu desenvolvimento, tanto a nível

profissional, com todo o conhecimento que obtive, como a nível pessoal com as competências que melhorei e desenvolvi.

É, ainda, de salientar a necessidade de investigação e desenvolvimento da reciclagem têxtil, nomeadamente a reciclagem mecânica, uma vez que a sua implementação é fundamental para promover a economia circular e tornar a indústria têxtil mais sustentável.

7 Referências

- Alagirusamy, R., & Das, A. (2015). Chapter 8 - Conversion of Fibre to Yarn: An Overview. Em R. Sinclair (Ed.), *Textiles and Fashion* (pp. 159-189): Woodhead Publishing.
- Arafat, Y., & Uddin, A. J. (2022). Recycled Fibers from Pre- and Post-consumer Textile Waste as Blend Constituents in Manufacturing 100% Cotton Yarns in Ring Spinning: A Sustainable and Eco-friendly Approach. *Heliyon*, 8(11), e11275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11275>
- Baykal, P., & Babaarslan, O. (2003). Determining an Optimum Opening Roller Speed for Spinning Polyester/ Waste Blend Rotor Yarns. *Textile Research Journal - TEXT RES J*, 73, 907-911. doi:10.1177/004051750307301010
- BCSD Portugal. (2023). Be@t - Bioeconomia no têxtil e vestuário. Em <https://bcsdportugal.org/bet-bioeconomia-no-textil-e-vestuario/>
- BISFA. (2017). *Terminology of Man-Made Fibres*. Em <https://bisfa.org/>
- Candido, R. G. (2021). Recycling of Textiles and its Economic Aspects. Em M. I. H. Mondal (Ed.), *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles* (pp. 599-624): Woodhead Publishing.
- CITEVE. (2023). Sobre o CITEVE. Em https://www.citeve.pt/artigo/sobre_nos
- CYCLO. (2023). Cyclo Fibers. Em <https://www.cyclofibers.com/>
- Damayanti, D., Wulandari, L. A., Bagaskoro, A., Rianjanu, A., & Wu, H.-S. (2021). Possibility Routes for Textile Recycling Technology. *Polymers*, 13(21). doi:10.3390/polym13213834
- Dockers. (2023). Why We Use Recycled Fibers. Em <https://us.dockers.com/pages/what-are-recycled-fibers>
- Duhoux, T., Maes, E., Hirschnitz-Garbers, M., Peeters, K., Asscherickx, L., Christis, M., Stubbe, B., Colignon, P., Hinzmann, M., & Sacheva, A. (2021). *Study on the Technical, Regulatory, Economic and Environmental Effectiveness of Textile Fibres Recycling*. Em
- Elhawary, I. A. (2015). Chapter 9 - Fibre to Yarn: Staple-Yarn Spinning. Em R. Sinclair (Ed.), *Textiles and Fashion* (pp. 191-212): Woodhead Publishing.
- European Parliament News. (2023). The Impact of Textile Production and Waste on the Environment (infographics). Em <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20201208STO93327/the-impact-of-textile-production-and-waste-on-the-environment-infographics>
- Faysal, G. M., Azad, T. N. S., Repon, M. R., Hossain, M. T., & Jalil, M. A. (2022). Sustainable Yarn Production using Leftover Fabric from Apparel Industries. *Heliyon*, 8(11). doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11377>
- Fibre2Fashion. (2022). Global Fibre Production Nearly Doubles to 113 mn Tonnes in 2021. *Fibre2Fashion*. Em <https://www.fibre2fashion.com/news/textile-news/global-fibre-production-nearly-doubles-to-113-mn-tonnes-in-2021-283471-newsdetails.htm>
- Fibre2Fashion. (2023). Ring and Rotor Spinning of Recycled Fibres. Em <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/8900/ring-and-rotor-spinning-of-recycled-fibres>

- Grand View Research. (2023). Textile Market Size, Share & Trends Analysis Report By Raw Material (Wool, Chemical, Silk), By Product (Natural Fibers, Polyester), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030. Em <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/textile-market>
- H&M. (2023). Tornar a Moda Mais Sustentável. Em <https://career.hm.com/pt-pt/sustainability/>
- Halimi, M. T., Hassen, M. B., Azzouz, B., & Sakli, F. (2007). Effect of Cotton Waste and Spinning Parameters on Rotor Yarn Quality. *The Journal of The Textile Institute*, 98(5), 437-442. doi:10.1080/00405000701547649
- Halimi, M. T., Hassen, M. B., & Sakli, F. (2008). Cotton Waste Recycling: Quantitative and Qualitative Assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), 785-791. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.11.009>
- Hasani, H., & Tabatabaei, S. (2010). Optimizing the Spinning Variables to Reduce the Hairiness of Rotor Yarns Produced from Waste Fibers Collected from Ginning Process. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 19.
- Hasani, H., Tabatabaei, S. A., & Amiri, G. (2012). Grey Relational Analysis to Determine the Optimum Process Parameters for Open-End Spinning Yarns. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7(2), 155892501200700212. doi:10.1177/155892501200700212
- Hawley, J. M. (2014). Textile Recycling. Em E. Worrell & M. A. Reuter (Eds.), *Handbook of Recycling* (pp. 211-217). Boston: Elsevier.
- Houck, M. M. (2009). *Identification of Textile Fibers* (1^a ed.): Elsevier Science.
- Ichim, M., & Sava, C. (2022). Study on Recycling Cotton Fabric Scraps into Yarns. 65-68.
- Jamshaid, H., Hussain, U., Mishra, R., Tichy, M., & Muller, M. (2021). Turning Textile Waste Into Valuable Yarn. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100341. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100341>
- Johnson, S., Echeverria, D., Venditti, R., Jameel, H., & Yao, Y. (2020). Supply Chain of Waste Cotton Recycling and Reuse: A Review. *AATCC Journal of Research*, 7, 19-31. doi:10.14504/ajr.7.S1.3
- Kering, & Textile Exchange. (2021). *Organic Cotton - A Fiber Classification Guide*. Em Textile Exchange: <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/organic-cotton-market-report/>
- Khan, M. K., & Rahman, H. (2018). Study of Effect of Rotor Speed, Combing-Roll Speed and Type of Recycled Waste on Rotor Yarn Quality Using Response Surface Methodology. doi:10.9790/019X-0214755
- Kiran, S., Rafique, M. A., Ashraf, A., Ahmad, I., Naz, S., & Afzal, G. (2021). New Emerging Green Technologies for Sustainable Textiles. Em N. Ibrahim & C. M. Hussain (Eds.), *Green Chemistry for Sustainable Textiles* (pp. 239-251): Woodhead Publishing.
- Kiron, M. I. (2021). Textile Fibers and Their Classification. Em <https://textilelearner.net/classification-of-textile-fibers/>
- Kiron, M. I. (2022a). Different Types of Yarn Spinning System. Em <https://textilelearner.net/different-types-of-yarn-spinning-system/>
- Kiron, M. I. (2022b). Unconventional and New Spinning System and Technologies. Em <https://textilelearner.net/modern-and-new-spinning-technologies/>

- Köhler, A., Watson, D., Trzepacz, S., Löw, C., Liu, R., Danneck, J., Konstantas, A., Donatello, S., & Faraca, G. (2021). *Circular Economy Perspectives in the EU Textile Sector*. Em JRC Publications Repository: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125110>
- Lord, P. R. (2003). *Handbook of Yarn Production: Technology, Science and Economics* (T. T. Institute Ed. 1ª ed.): Woodhead Publishing Ltd.
- Määtänen, H. (2023). *The Challenges and Economic Benefits of Utilising Circular Economy in the Production of Textiles*. (Licenciatura). Lappeenranta-Lahti University of Technology,
- Malinverno, N., Schmutz, M., Nowack, B., & Som, C. (2023). Identifying the Needs for a Circular Workwear Textile Management. *Resources, Conservation and Recycling*, 189, 106728. doi:10.1016/j.resconrec.2022.106728
- Decreto-Lei 163/2004, de 3 de Julho, (2004).
- Piribauer, B., & Bartl, A. (2019). Textile Recycling Processes, State of the Art and Current Developments: A Mini Review. *Waste, Management & Research*, 37(2), 112-119. doi:10.1177/0734242x18819277
- Polopiqué. (2023). Em <https://www.polopique.pt/pt>
- Pure Waste. (2023). Responsibly Produced Recycled Clothing. Em <https://purewaste.com/?v=f0aa03aaca95>
- Recover. (2023). Products. Em <https://recoverfiber.com>
- REPREVE. (2023). Discover Repreve. Em <https://repreve.com/discover-repreve>
- Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni Pisapia, C., Purnell, P., McQueen-Mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical, Chemical, Biological: Moving towards Closed-loop Bio-based Recycling in a Circular Economy of Sustainable Textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>
- Shuvo, I. I. (2020). Fibre Attributes and Mapping the Cultivar Influence of Different Industrial Cellulosic Crops (Cotton, Hemp, Flax, and Canola) on Textile Properties. *Bioresources and Bioprocessing*, 7(1), 51. doi:10.1186/s40643-020-00339-1
- Sinclair, R. (2015). Chapter 1 - Understanding Textile Fibres and Their Properties: What is a Textile Fibre? Em R. Sinclair (Ed.), *Textiles and Fashion* (pp. 3-27): Woodhead Publishing.
- Smole, M. S., Hribernik, S., Kleinschek, K. S., & Kreže, T. (2013). Plant Fibres for Textile and Technical Applications. Em G. Stanislav & S. Andrzej (Eds.), *Advances in Agrophysical Research* (pp. 30). Rijeka: IntechOpen.
- Statista. (2023). Production Volume of Chemical and Textile Fibers Worldwide from 1975 to 2021. Em <https://www.statista.com/statistics/263154/worldwide-production-volume-of-textile-fibers-since-1975/>
- Subash, M. c., & Muthiah, P. (2021). Eco-friendly Degumming of Natural Fibers for Textile Applications: A Comprehensive Review. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100304. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100304>

- Textile Exchange. (2022). *Preferred Fiber & Materials Market Report*. Em Textile Exchange: <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/preferred-fiber-and-materials/>
- USTER. (2023). USTER® STATISTICS 2023. Em <https://www.uster.com/value-added-services/uster-statistics/>
- Wanassi, B., Azzouz, B., & Hassen, M. B. (2016). Value-added Waste Cotton Yarn: Optimization of Recycling Process and Spinning of Reclaimed Fibers. *Industrial Crops and Products*, 87, 27-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.020>
- Yilmaz, D., Yelkovan, S., & Tirak, Y. (2017). Comparison of the Effects of Different Cotton Fibre Wastes on Different Yarn Types. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 25, 19-30. doi:10.5604/01.3001.0010.2340
- Yurtaslan, Ö., Kurtoğlu, Ş., & yilmaz, D. (2022). Closed-loop Mechanical Recycling Opportunities in Industrial Cotton Wastes. *Journal of Natural Fibers*, 19, 1-16. doi:10.1080/15440478.2022.2044961
- Zhang, X. (2023). Research on Sustainable Furniture Design Based on Waste Textiles Recycling. *Sustainability*, 15. doi:10.3390/su15043601

Apêndice A Determinação do Número de Fitas para a 2ª Passagem no Laminador

De modo a determinar o número de fitas estiradas que devem ser colocadas na 2ª passagem no laminador, realizou-se alguns cálculos que permitem estimar a gramagem que deve ser alimentada ao laminador para obter mechas com um título Ne de cerca de 0,9.

Em primeiro lugar, é necessário determinar a gramagem da fita estirada, isto é, o peso de um metro da fita obtida após a 1ª passagem.

De seguida, determina-se a estiragem real, E_{real} , que está a ser aplicada no laminador através da equação seguinte.

$$E_{real} = \frac{\text{gramagem média das fitas cardadas} \times n^{\circ} \text{ de fitas}}{\text{gramagem da fita estirada obtida}}$$

Aplicando a equação seguinte, é possível determinar o título Ne de entrada, correspondente ao “título” do conjunto de fitas que deve ser alimentado ao laminador para a produção da mecha.

$$E = \frac{Ne \text{ de saída}}{Ne \text{ de entrada}} \langle \Rightarrow \rangle Ne \text{ de entrada} = \frac{Ne \text{ de saída}}{E}$$

É de referir que se considera o Ne de saída igual a 0,9, uma vez que se pretende obter mechas com esse título de forma a otimizar o processo de fiação.

Por fim, converte-se o valor de Ne obtido em gramagem, recorrendo à equação seguinte.

$$\text{Gramagem [g/m]} = \frac{0,59}{Ne}$$

Assim, uma vez que a gramagem das fitas estiradas é conhecida, é possível estimar quantas fitas devem ser alimentadas na 2ª passagem no laminador, de forma a alimentar a gramagem determinada anteriormente ou superior.