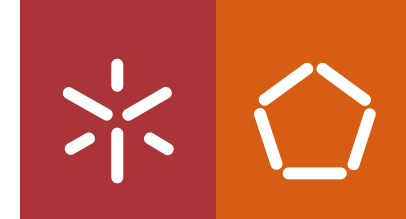


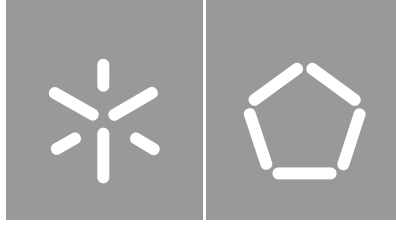


Rute Marisa Rêgo dos Santos

Circularidade na Indústria Têxtil: Medição
de Impacte e Análise do Ciclo de Vida de
Produto

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Rute Marisa Rêgo dos Santos

Circularidade na Indústria Têxtil: Medição de Impacte e Análise do Ciclo de Vida de Produto

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Design e Marketing de Produto Têxtil Vestuário e Acessórios

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)

Professora Doutora Maria José Araújo Marques Abreu

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

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

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que contribuíram para o sucesso e conclusão desta dissertação.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professora Doutora Maria José Araújo Marques Abreu, pela sua orientação, apoio e valiosos *insights* ao longo de todo o processo. Sua orientação foi fundamental e sou grata pela sua dedicação e disponibilidade.

Agradeço à empresa RDD Textiles por ter fornecido os recursos necessários para a realização deste estudo. O apoio da equipa foi fundamental para a realização da pesquisa e para a obtenção dos resultados apresentados nesta dissertação.

Agradeço também à minha família e amigos pelo apoio incondicional ao longo deste processo. Obrigada por me terem encorajado nos momentos mais difíceis para superar os desafios e dificuldades encontrados durante a pesquisa.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

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

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

Universidade do Minho, dezembro de 2023

Nome completo: Rute Marisa Rego dos Santos

Assinatura: 

RESUMO

O presente estudo, intitulado “Circularidade na Indústria Têxtil: Medição de impacto e análise do ciclo vida de produto” teve como principal objetivo, através da ferramenta Análise do Ciclo de Vida (ACV), avaliar os impactos ambientais associados ao desenvolvimento de uma malha jersey com utilização de fibra reciclada pré e pós consumo e compará-la com outras malhas jersey em 100% algodão (convencional e orgânico) e 50% algodão e 50% algodão reciclado pré-consumo.

Através do ACV foi possível identificar que os processos de fiação, tingimento e acabamento possuem maiores contribuições relativas para as diferentes categorias de impacto ambiental analisadas. Relativamente à matéria-prima utilizada, foi possível verificar que o algodão orgânico possui maior contribuição para as categorias de impacto ambientais quando comparado com o algodão reciclado mecanicamente (pré e pós consumo). No entanto, não existe nenhuma categoria de impacto que consiga medir ou determinar a contribuição da utilização de um material reciclado, ou seja, a contribuição para os impactos evitados decorrentes da produção do produto virgem.

Relativamente às propriedades físicas da malha jersey desenvolvida, verificou-se que esta possui um comportamento similar às malhas utilizadas para comparação.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); reciclagem; impactos ambientais; algodão reciclado pré-consumo; algodão reciclado pós-consumo.

ABSTRACT

The present study, entitled "Circularity in the Textile Industry: Impact Assessment and Product Life Cycle Analysis," was conducted in collaboration with RDD Textiles, a textile company. The main goal of this dissertation was to evaluate the environmental impact of a jersey fabric developed using pre- and post-consumer recycled fibers, through the application of the Life Cycle Assessment (LCA) tool. The environmental impact of this fabric was compared with other jersey fabrics made from 100% conventional cotton, 100% organic cotton, and a blend of 50% organic cotton and 50% pre-consumer recycled cotton.

The LCA analysis revealed that the spinning, dyeing, and finishing processes had the highest relative contributions to the different environmental impact categories studied. In terms of raw material, it was found that organic cotton had a greater environmental impact compared to recycled cotton (both pre- and post-consumer). However, there is no specific impact category that measures or determines the contribution of using recycled materials, i.e., the reduction in environmental impacts resulting from the use of recycled fibers instead of virgin materials.

Regarding physical properties, the developed jersey fabric exhibited similar behavior when compared to the other fabrics analyzed.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); recycling; environmental impact; pre-consumer recycled cotton; post-consumer recycled cotton.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura da Dissertação	3
2. RDD Textiles	5
3. ESTADO DA ARTE	6
3.1. Economia Circular na Indústria Têxtil	6
3.2. Inovações Tecnológicas	9
3.2.1. Matéria-Prima TAKE	9
3.2.2. Produção MAKE	12
3.2.3. Consumo USE	13
3.2.4. Descarte WASTE	15
3.3. Desafios e Oportunidades	20
3.4. Medição de Impacto: Análise do Ciclo de Vida	27
4. ENQUADRAMENTO DO PROCESSO E PRODUTO	29
4.1. Descrição do Processo Produtivo	29
4.1.1. <i>Reciclagem e produção do fio</i>	29
4.1.2. <i>Produção de Malha</i>	31
4.1.3. <i>Enobrecimento Têxtil</i>	31
4.2. Especificações do produto	32
4.3. Avaliação do ciclo de vida	32

4.3.1. Enquadramento	32
4.3.2. Definição da unidade funcional.....	35
4.3.3. Fronteiras do Sistema	35
4.3.4. Inventário.....	36
5. DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	43
5.1. Análise do Ciclo de Vida de produto	43
5.2. Propriedades Físicas	61
6. CONCLUSÃO.....	64
7. REFERÊNCIAS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do modelo linear na indústria têxtil.....	6
Figura 2 - Esquema representativo do modelo circular na indústria têxtil.....	7
Figura 3 - Impacto climático relativo nas principais etapas do ciclo de vida de produto.....	9
Figura 4 - Estratégias principais para o design circular	13
Figura 5 - Modelos de negócio circulares.....	14
Figura 6 - Fluxo dos materiais têxteis em 2015	16
Figura 7 - Fluxo de matérias-primas, incluindo pós-consumo	17
Figura 8 - Projeção da evolução da reciclagem de resíduos têxteis para 2030.....	18
Figura 9 - Processo adotado pela Valérius 360° para a reciclagem dos materiais têxteis até à obtenção de fio.....	19
Figura 10 - Medidas e iniciativas discutidas e implementadas a nível europeu durante os últimos anos.	20
Figura 11 - roteiro de princípios fundamentais do Pacto Ecológico Europeia.....	21
Figura 12 – Etapas do processo têxtil a considerar para o caso de estudo.	29
Figura 13 - Jersey simples: a) esquema representativo de tricotagem; b) malha obtida.	31
Figura 14 - Estrutura e aplicações da ACV.....	33
Figura 15 – Descrição das fronteiras do sistema do produto.....	36
Figura 16 – Fluxograma de entradas e saídas ao longo do processo produtivo.....	37
Figura 17 – Balanços de massa com foco na matéria-prima usada nos processos do ciclo da malha desenvolvida, 60%algodão orgânico, 20%algodão reciclado pré-consumo e 20%algodão reciclado pós-consumo, e avaliada no presente estudo.....	38
Figura 18 - Categorias de impacte ambiental com a contribuição dos processos incluídos no <i>UPSTREAM</i> e no <i>CORE</i>	45
Figura 19 – Impacte por categoria ambiental para a produção da fibra de algodão convencional e algodão orgânico.	46
Figura 20 - Contribuição da produção de fibra em cada categoria de impacte.....	47
Figura 21 - Contribuição das diferentes fases de processamento em cada categoria de impacte.	48
Figura 22 - Origem da energia rede EDP.	49
Figura 23 - Contribuição do processo de produção da fibra de algodão orgânico, fiação do fio usado para o produto RDD1389-ML e acabamento do produto RDD1389-ML nas categorias de impacte GWP e ODP.	51

Figura 24 - Contribuição das diferentes fases de processamento para processo com e sem tingimento em cada categoria de impacto.	52
Figura 25 - Contribuição das diferentes fases de processamento (considerando tingimento) em cada categoria de impacto.	54
Figura 26 - Contribuição do processo de tingimento para a categoria de impacto GWP.	55
Figura 27 – Consumo de energia para o processamento de malha com e sem processo de tingimento em MJ/kg malha.	56
Figura 28 - Consumo de água para o processamento de malha com e sem processo de tingimento em m³.	56
Figura 29 - Resultados comparativos para a categoria de impacto Acidificação, Eutrofização e Aquecimento Global considerando diferentes origens para a fibra de algodão.	59
Figura 30 - Contribuição de cada produto para cada categoria de impacto relacionado com a matéria-prima.	60
Figura 31 - Contribuição do produto RDD1389-ML e 50%CO Org/50%CO REC. 360 (pré-consumo) para cada categoria de impacto relacionado com a matéria-prima.	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de práticas a adotar para uma EC	8
Tabela 2 - Desafios e oportunidades.....	25
Tabela 3 – especificações técnicas do produto RDD1389-ML.	32
Tabela 4 – Inventário processo de produção do algodão orgânico proveniente da base de dados ecoinvent (versão 3.8, 2021).	38
Tabela 5 - Inventário do processo de produção do algodão reciclado pré e pós-consumo.	39
Tabela 6 - Inventário do processo de fiação para fio Ne 20/1.	40
Tabela 7 - Inventário do processo de tricotagem.	41
Tabela 8 - Inventário do processo de acabamento.	42
Tabela 9- Inventário para o processo de tingimento.	53
Tabela 10 - Poupanças (savings) da utilização do processo de acabamento sem tingimento em alternativa ao processo com tingimento.	57
Tabela 11 - Resultados para cada categoria de impacto ambiental considerando a origem da fibra quando comparados com a mistura utilizada para a obtenção do produto RDD1389-ML.	58
Tabela 12 – Resultados obtidos para os testes (propriedades físicas) realizados a cada uma das malhas.	62

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, as empresas deparam-se com um mercado altamente competitivo, no qual a habilidade de responder de forma ágil a desafios e mudanças no ambiente de negócios é crucial. Nesse sentido, o acesso facilitado à informação e a partilha de conhecimento através de parcerias estratégicas nas diferentes fases da cadeia de valor são essenciais para impulsionar a inovação, competitividade e o desenvolvimento sustentável da indústria têxtil.

Atualmente, o setor têxtil e do vestuário gera, mundialmente, cerca de 92 milhões de toneladas de resíduos por ano. Segundo um relatório da Agência Europeia do Ambiente (AEA), o consumo de têxteis na União Europeia (UE) tem um dos maiores impactos no ambiente e nas alterações climáticas. Os têxteis ocupam o terceiro lugar em termos de consumo de água e utilização do solo, e o quinto lugar em termos de consumo de matérias-primas e emissões de gases de efeito estufa (European Environment Agency, 2023; Parlamento Europeu, 2023). A maioria dos têxteis é eliminado como parte dos resíduos urbanos, sendo incinerados para a produção de energia. Apenas 38% do descarte têxtil é utilizado para reutilização e reciclagem. A produção de têxteis aliado às grandes quantidades de produtos químicos consumidos tornou o impacto ambiental deste setor uma das questões mais preocupantes da atualidade, obrigando o setor a tomar medidas para minimizar os seus impactos (European Environment Agency, 2023).

1.1. Enquadramento e motivação

Como consumidores, conhecemos muito pouco da Indústria Têxtil, mesmo existindo um Cluster Têxtil abrangente e muito importante a nível Mundial em Portugal. O Cluster Têxtil em Portugal é uma iniciativa que reúne empresas, instituições de ensino, centros de investigação e outras entidades relacionadas com o setor têxtil, com o objetivo de promover a colaboração, inovação e competitividade da indústria (Cluster Têxtil, 2017).

No passado, o acesso à informação e a partilha de conhecimento na indústria têxtil eram muito limitados. As empresas e profissionais do setor tinham dificuldades em obter informações atualizadas sobre novas tecnologias, tendências de mercado e melhores práticas, resultando na falta de inovação e competitividade, além de dificultar o desenvolvimento sustentável da indústria. Neste contexto, o papel do Cluster Têxtil em Portugal torna-se ainda mais relevante. Adicionalmente, considerando que o consumidor está cada vez mais exigente e consciente, procurando produtos que atendam às suas necessidades específicas, como o conforto, durabilidade, design, sustentabilidade, entre outros, é necessário perceber o que pode gerar valor para o mesmo e mostrar como os produtos estão ligados às

suas necessidades. Ao compreender as necessidades do consumidor as empresas têm a oportunidade de adaptar os seus produtos e/ou serviços para dar resposta às expectativas do mercado (Jia et al., 2020; Koszewska, 2018)

Os crescentes desafios associados ao descarte de resíduos têxteis e a crescente procura por produtos circulares tem motivado as empresas a desenvolver modelos de negócios circulares (MNC). Esta transição para um modelo circular na indústria têxtil envolve uma série de desafios, incluindo a necessidade de repensar os processos de produção, o design de produtos, a reciclagem, entre outros. Para isso, é necessário envolver todos os intervenientes da cadeia de valor, desde os produtores de matéria-prima até ao consumidor final (Dissanayake & Weerasinghe, 2022; Jia et al., 2020).

Esta dissertação tem como objetivo o estudo das categorias de impacto ambiental associadas ao desenvolvimento de uma malha em que parte da composição da mesma possui a incorporação de resíduos têxteis pós-consumo. O estudo das categorias de impacto será realizado através a análise do ciclo de vida (ACV), comparando os impactos ambientais obtidos para produto desenvolvido com produtos similares, no entanto, com composições/matérias-primas diferentes.

1.2. Objetivos

Atualmente existem algumas ferramentas que são utilizadas para medir a circularidade e o ciclo de vida de um produto. Temos o caso da ferramenta *Circulytics* (Foundation, Circulytics, 2020) e do CTI Tool (CTI Tool - WBCSD, 2023) que permitem, através de informações fornecidas pelas empresas, atribuir um nível de circularidade, dependendo das práticas que a empresa adote relativamente a processos, produtos e pessoas. No entanto, para que consiga medir circularidade nas empresas é necessário que os sistemas existentes estejam bem definidos e consolidados para melhor entendimento do produto por elas transformado. Assim, o estudo realizado ao longo desta dissertação é focado nos processos e, principalmente, produtos, considerando a utilização de resíduos pós-consumo para a produção de fibra e posterior processamento em fio, malha e finalmente malha acabada/enobrecida. Para isso, irá ser feita uma análise do ciclo de vida (ACV) para uma malha Jersey com 60% algodão orgânico, 20% algodão reciclado “pré-consumo” (resultante de desperdícios, principalmente, de corte de confeção) e 20% algodão orgânico pós-consumo. Posteriormente, os valores obtidos serão comparados com os resultados obtidos para 4 malhas similares, no entanto, com composições diferentes:

- Jersey 100% algodão convencional
- Jersey 100% algodão orgânico
- Jersey 50% algodão orgânico / 50% algodão reciclado pré-consumo

O estudo será conduzido de acordo com as normas:

- ISO 14040:2008: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e enquadramento
- ISO 14044:2006: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e linhas de orientação

Não existindo ainda dados concretos e/ou métricas para os impactes ambientais inerentes a estas malhas recicladas, principalmente, no que se refere à utilização de resíduos pós-consumo, será um desafio perceber de que forma os resultados desta análise irão refletir a circularidade do produto final.

1.3. Metodologia

Com o objetivo de prevenir os resíduos, com destaque para os têxteis, têm sido desenvolvidas novas tecnologias e processos, bem como novas ferramentas para calcular o impacto ambiental do setor. Uma das ferramentas que se tornou um instrumento crucial para entender e abordar a pegada ecológica de marcas de moda e vestuário é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Esta metodologia mede os impactos ambientais de um produto ao longo da sua vida útil, incluindo: produção/cultivo de matérias-primas, processos de produção, transporte dos materiais e do produto. Os resultados são apresentados através de diferentes indicadores (como emissões de gases de efeito estufa (GEE), consumo de energia não renovável, consumo de água, entre outros) e podem ser usados como base para escolher materiais e processos com um menor impacto ambiental.

Para o presente trabalho, através da metodologia ACV, são analisadas as diferenças em cada categoria de impacto ambiental quando utilizamos algodão reciclado em comparação com o algodão convencional e algodão orgânico. Adicionalmente, são identificados no processo produtivo, de cada uma das malhas em estudo, as fases com maior contribuição, ou seja, que fases possuem um impacto significativo na produção do produto.

Para realizar essa análise, utilizou-se o software SimaPro versão 9.1.1., para calcular os impactos ambientais das 4 malhas em análise. A metodologia usada para a avaliação dos impactes foi o método EPD (2018) versão v1.01. A base de dados utilizada foi a do ecoinvent (versão 3.8, 2021). No subcapítulo 3.3, é apresentado com maior detalhe o enquadramento para ACV e como será aplicada na comparação das diferentes malhas.

1.4. Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em sete capítulos. O primeiro capítulo possui a introdução, abordando o enquadramento e motivação e os objetivos definidos para o trabalho a desenvolver.

No Capítulo 1 é feito o enquadramento e motivação para a realização desta dissertação, identificando os principais objetivos a atingir assim como a metodologia a utilizar.

No Capítulo 2 é feita a apresentação da empresa RDD Textiles, empresa na qual foi desenvolvida a componente prática desta dissertação.

Posteriormente, no Capítulo 3 é feito o estudo do conteúdo existente na literatura, abordando a importância da Economia Circular, as principais inovações tecnológicas existentes, os desafios e oportunidades que encontramos no setor têxtil atualmente e, por fim, a ferramenta de medição de impacto do ciclo de vida de um produto (ACV) como uma ferramenta de medição de circularidade.

No Capítulo 4 é feito, numa primeira fase, o enquadramento do processo produtivo desde a reciclagem ao enobrecimento têxtil. Posteriormente são apresentadas as especificações do produto desenvolvido assim como o enquadramento para a análise do ACV do mesmo.

No Capítulo 5 é feita a análise e discussão dos resultados obtidos para a ACV assim como para os resultados obtidos para as propriedades físicas da malha desenvolvida – RDD1389-ML.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvidos e aos resultados obtidos.

2. RDD Textiles

A RDD Textiles é uma empresa do setor têxtil, sediada em Barcelos, constituída em 2020 com o objetivo de inovar a cadeia de abastecimento da moda, fornecendo inovações têxteis sustentáveis a marcas globais.

A empresa tem como missão o desenvolvimento de materiais têxteis, principalmente, malhas que sejam ambientalmente responsáveis, através da utilização de tecnologias emergentes e matérias-primas inovadoras, com o intuito de reduzir o impacto ambiental dos seus processos e produtos. Para alcançar esse objetivo, apoia diferentes *players* na cadeia de abastecimento, incentivando a inovação através da partilha de conhecimento, transparência e cooperação.

A RDD colabora com todas as empresas do Grupo Valerius, bem como outros parceiros, para desenvolver e comercializar tecnologias de ponta. Análises de impacto são realizadas em processos e produtos como parte do seu trabalho.

A RDD explora intensivamente novas formas de utilizar materiais de base bio, regenerativos e reciclados, com o objetivo de promover uma relação simbiótica entre a indústria e a inovação, promovendo o desenvolvimento e utilização de processos e produtos mais responsáveis. A colaboração com diversos *players* e inovadores é essencial para o desenvolvimento, teste de aplicações industriais e *scale up* de novos projetos impactantes, como inovações em tingimento como *Colorifix*, *Living Ink Algae Ink™* e *Recycrom™*, ou a exploração de pigmentos sustentáveis de alto desempenho, como a coleção *Bioblacks*. No que diz respeito à utilização de materiais reciclados, a RDD trabalha em estreita colaboração com a Valerius 360°, empresa de reciclagem da empresa têxtil e de confeção portuguesa Valérius. Com instalações próprias, a Valerius 360° pode produzir fios com uma percentagem de conteúdo reciclado superior a 50%.

Além do seu trabalho inovador, a RDD também oferece serviços de consultoria que adotam uma abordagem orientada para a sustentabilidade e incorporam diferentes tecnologias, com foco no desenvolvimento de produtos.

Certificações:

GOTS - Global Organic Textile Standard

OCS - Organic Content Standard

GRS - Global Recycled Standard

RCS - Recycled Claim Standar

3. ESTADO DA ARTE

Nos últimos anos, tem havido um notável avanço tecnológico na indústria têxtil, refletindo-se no aumento da produtividade e competitividade das empresas, bem como no desenvolvimento económico do setor. Neste contexto, o conhecimento desempenha um papel fundamental para atingir a competitividade na indústria têxtil. A circularidade e os modelos de negócio circulares são uma temática em foco em toda a cadeia de valor têxtil, não existindo ainda algo efetivo e representativo o suficiente para transmitir a mensagem pretendida (Ellen MacArthur Foundation & IDEO, 2018; Geissdoerfer et al., 2017; Koszewska, 2018).

3.1. Economia Circular na Indústria Têxtil

A economia circular (EC) tem ganho destaque na indústria têxtil, com um foco crescente na redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais ao longo do ciclo de vida dos produtos têxteis. Esta procura restaurar e regenerar os recursos naturais, utilizando-os de forma eficiente, encontrando valor em todas as etapas do ciclo de vida do produto, isto é, tem como objetivo maximizar a eficiência dos recursos e minimizar o desperdício (Brydges, 2021; Dissanayake & Weerasinghe, 2022; Koszewska, 2018; Sandberg & Hultberg, 2021).

Numa economia linear, o processo industrial é caracterizado pelo fluxo unidirecional de materiais, ou seja, as matérias-primas são transformadas no produto final e, posteriormente, em resíduos descartáveis. Na Figura 1 está apresentado um esquema que representa o modelo linear. Isto é, o processo inicia com utilização de recursos naturais que são transformados em matéria-prima (*take*). Posteriormente, esta matéria-prima é utilizada para desenvolver/produzir um produto (*make*). Após distribuição e utilização (consumidor) (*use*) esse produto é descartado (*waste*) acabando, na maioria dos casos, em aterro (Chen et al., 2021; Jia et al., 2020; Koszewska, 2018; Whicher et al., 2018).



Figura 1 - Esquema representativo do modelo linear na indústria têxtil.

No conceito de EC, a recuperação e valorização dos resíduos permitem a reutilização de materiais na cadeia de abastecimento. O objetivo é mitigar a existência de desperdícios ou riscos para o meio ambiente, tornando a cadeia de valor num ciclo infinito (Chen et al., 2021; Koszewska, 2018; Whicher et al., 2018). Na Figura 2 é apresentado um esquema representativo do modelo para uma EC.

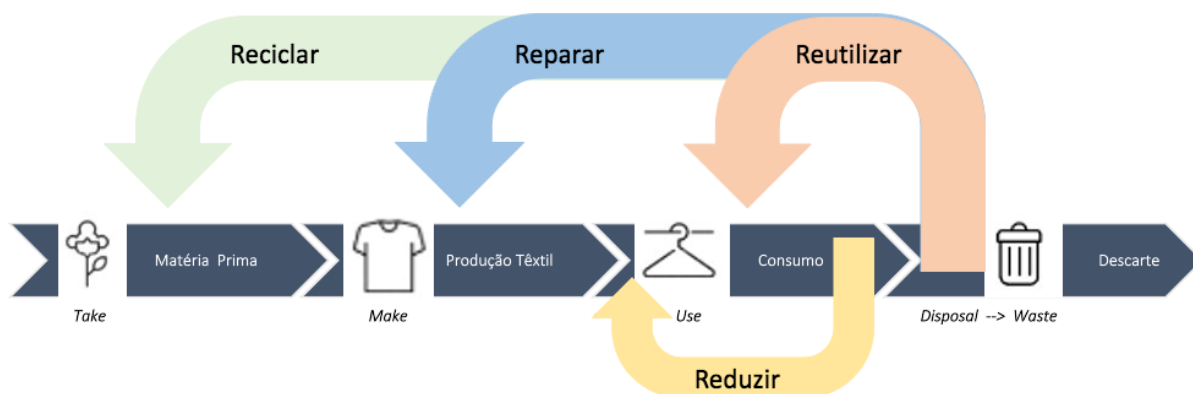


Figura 2 - Esquema representativo do modelo circular na indústria têxtil (Whicher et al., 2018).

A circularidade de um material refere-se à sua capacidade de ser reintegrado em ciclos de produção, minimizando a extração de recursos naturais e o desperdício. O conceito dos 3Rs (Reduzir, Reutilizar e Reciclar) está intimamente ligado à economia circular, sendo esta abordagem essencial para a gestão de resíduos (Manickam & Duraisamy, 2019).

A implementação de estratégias para a economia circular, como os 3Rs, é impulsionada por avanços tecnológicos que permitem a criação de soluções inovadoras para a redução do consumo, a reutilização de produtos e a reciclagem de materiais.

A nova hierarquia de gestão de resíduos expande os princípios dos 3R's para os 5R's. Os 5R's (recusar, reduzir, reutilizar, reaproveitar e reciclar) funcionam como diretrizes para minimizar o desperdício priorizando quatro ações antes de considerar a reciclagem, sempre que possível: recusar a aquisição de produtos desnecessários, reduzir a quantidade de resíduos produzidos, reutilizar materiais para prolongar sua vida útil e reaproveitar materiais ou produtos de maneiras criativas. A reciclagem deve ser considerada apenas como último recurso, quando as outras opções não são viáveis. Esta abordagem tem como objetivo maximizar a eficiência e minimizar o impacto ambiental associado à gestão de resíduos (Com et al., 2022).

Na Tabela 1 estão apresentadas algumas práticas para a EC que se podem adotar, considerando a fase da cadeia de valor em que se enquadram (Brydges, 2021; Dissanayake & Weerasinghe, 2022; Koszewska, 2018).

Tabela 1 - Exemplos de práticas a adotar para uma EC (Brydges, 2021; Dissanayake & Weerasinghe, 2022).

Fase Cadeia Valor	Exemplos de práticas para a EC
Matéria-Prima <i>TAKE</i>	Optar pela utilização de fibras naturais <i>vs</i> reduzir a utilização de materiais com misturas
	Proximidade - Trabalhar próximo dos fornecedores de matéria-prima
	Medir e Quantificar o impacto ambiental dos processos produtivos (exemplo: consumo água e produtos químicos utilizados, principalmente, no processo tingimento)
	Adoção de técnicas de tingimento mais sustentáveis e utilização processos de tingimento de baixo impacto ambiental
Produção <i>MAKE</i>	Adotar técnicas de design modular e o corte otimizado (corte a laser)
	Apresentação de coleções intemporais em vez de coleções por estação
	Estabelecer parcerias estratégicas, para expandir capacidade e recursos, aproveitando o conhecimento e a experiência das outras organizações
Consumo <i>USE</i>	Adoção de práticas de cuidado adequadas para prolongar a vida útil dos produtos têxteis (instruções lavagens)
	Promover programas e/ou parcerias Upcycling, Repair, retoma (takeback)
Descarte <i>WASTE</i>	Reciclagem
	Investimento em sistemas de gestão de resíduos (reciclagem têxtil) mais eficientes e em tecnologias de tratamento de água e efluentes (reciclagem da água)

Estas práticas para a EC são potenciadas pela inovação tecnológica, desempenhando um papel fundamental na transição para uma economia circular, impulsionando a transformação dos modelos de negócios e promovendo a sustentabilidade ambiental.

3.2. Inovações Tecnológicas

A produção de materiais, como podemos ver na Figura 3, é a fase de maior impacto climático em todo o ciclo de vida do produto (Business of Fashion & McKinsey & Company, 2023).



Figura 3 - Impacto climático relativo nas principais etapas do ciclo de vida de produto (Business of Fashion & McKinsey & Company, 2023).

A indústria têxtil tem observado um aumento no desenvolvimento de tecnologias e processos inovadores que promovem a circularidade. Estas tecnologias têm como principal objetivo mitigar o impacto do produto desenvolvido, considerando cada uma das fases da cadeia de valor. Isto inclui a utilização de materiais biodegradáveis, a aplicação de técnicas de design sustentável, a implementação de sistemas de gestão de resíduos mais eficientes e a reciclagem de fibras têxteis.

3.2.1. Matéria-Prima | TAKE

3.2.1.1. Fibra

A utilização de materiais biodegradáveis na indústria têxtil é uma tendência crescente. Neste contexto, temos a aplicação de fibras naturais, como algodão orgânico, cânhamo e linho, que são consideradas mais sustentáveis em comparação com as fibras sintéticas.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidas novas tecnologias que permitiram a obtenção de novas fibras, como é o caso Spinnova, fibra produzida a partir de celulose, a mesma polpa utilizada para fazer

¹ O resultado final do processo de produção de material é fibra têxtil;

² O impacto dos microplásticos não é considerado no valor apresentado;

³ Não inclui o uso de energia no processo reciclagem

papel. A polpa é produzida mecanicamente, sem a utilização produtos químicos nocivos, poluição ou resíduos. Recentemente, através da parceria com a Renewcell, a Spinnova pretende utilizar como matéria-prima a Circulose® (Spinnova, n.d.). A Renewcell, empresa sediada na Finlândia, desenvolveu, a partir da reciclagem de resíduos têxteis pós-consumo, a Circulose®. Atualmente, a Circulose® é misturada com outra celulose, e através do processo de viscose, obtém-se uma fibra 100%Viscose (CV) onde 30% dessa viscose é Circulose® (Renewcell, n.d.).

Existem ainda novas fibras à base de liocel como o *r-lyocel* da Evrnu. A matéria-prima utilizada para o desenvolvimento desta fibra são resíduos pré e pós-consumo, ricos em algodão. Estes resíduos são reciclados quimicamente, obtendo-se assim a fibra de liocel reciclado, o NuCycl® (Evrnu, n.d.).

Práticas de agricultura regenerativa têm sido introduzidas e utilizadas, permitindo que um maior número de produtores de materiais virgens opte por soluções mais sustentáveis, como a agricultura regenerativa. No entanto, atualmente não existe uma definição clara ou critérios de medição para a agricultura regenerativa. É uma abordagem holística que visa “proteger a Natureza” (Esha Chhabra, 2023; Khangura et al., 2023; Newton et al., 2020).

3.2.1.2. Fio

O processo de desenvolvimento de novos fios enfrenta desafios devido às características físicas das fibras, que afetam o processo de fiação como um todo.

Considerando as fibras apresentadas no subcapítulo 3.2.1.1, não existe nenhuma limitação dado que o processo de obtenção das mesmas, por exemplo Circulose® e NuCycl®, é químico. Isto é, a uniformidade e comprimento da fibra obtida não apresenta limitações para o processo de fiação. Quando consideramos fibras naturais como a urtiga, o cânhamo, fibras obtidas a partir de reciclagem mecânica, entre outras, podemos ter algumas limitações para o processo de fiação. Isto acontece devido a vários fatores como o comprimento da fibra, a uniformidade da fibra, a tenacidade da fibra, entre outros. Estas características limitam o processo de fiação, por exemplo, no que diz respeito à percentagem a utilizar destas fibras na produção do fio. Normalmente, para fibras como cânhamo ou urtiga encontramos misturas em fio com [20-30] % destas fibras.

Existem alternativas para que seja possível aumentar a quantidade a utilizar destas fibras no processo de fiação – utilizar fibra base com maior comprimento, no entanto, iremos ter um reflexo naquele que é o custo de produção de fio e, posteriormente, produto acabado.

Por outro lado, existem ainda novos materiais disruptivos a considerar: os materiais alternativos ao couro como o da Piñatex® - material desenvolvido partir de fibras de celulose extraídas de folhas de ananás pela (Ananas Anam, 2017).

3.2.1.2. Enobrecimento Têxtil

O desenvolvimento de técnicas de tingimento mais sustentáveis e processos de tingimento de baixo impacto ambiental é uma área importante na indústria têxtil, almejando reduzir o impacto ambiental associado ao processo de tingimento (Ellen MacArthur Foundation, 2021; Lara et al., 2022).

No tingimento convencional, a água é usada como solvente, no tingimento supercrítico com dióxido de carbono (CO₂), o CO₂ substitui a água como solvente. No estado supercrítico, o CO₂ possui dupla funcionalidade: ter solubilidade como um líquido e propriedades de fluxo como um gás. Devido às suas propriedades gasosas, o CO₂ pode circular no equipamento de tingimento e depositar os corantes no material têxtil a tingir. Quando o tingimento termina, o equipamento de tingimento a alta pressão contendo o CO₂ é despressurizado. Como resultado, o CO₂ volta ao seu estado gasoso e o corante, que não consegue permanecer dissolvido num gás normal, fica depositado no fundo do equipamento de tingimento. No final, o CO₂ e o corante podem ser recuperados. No final do processo, não existe efluente de água e a energia e produtos químicos necessários são menores. Empresas como a ECO2 Dye e a Deven Supercriticals são pioneiras neste tipo de processo de tingimento em têxteis (Fashion for Good, 2023; Goñi et al., 2021; Lara et al., 2022; Nayak et al., 2020).

Processos de tingimento por spray, ultrasons, entre outros são também utilizados como processos alternativos ao tingimento convencional (Fashion for Good, 2023):

AirDye® - processo de sublimação onde o pigmento é transferido para o substrato têxtil, através da utilização de um papel combinado com calor e pressão. No final do processo o papel e os corantes – que são inertes, ou seja, voltam ao seu estado original - são reutilizados em processos seguintes. Este processo comparado com o processo convencional de tingimento utiliza menos 95% de água e menos 86% de energia (AirDye, n.d.; Fashion for Good, 2023; Lara et al., 2022; Nayak et al., 2020).

Ultrasons - As ondas ultrassônicas são ondas acústicas que criam milhares de bolhas microscópicas numa formulação e, quando rebentam, libertam grandes quantidades de energia causando uma rápida difusão do corante, aumentando a eficiência do tingimento (Fashion for Good, 2023; Lara et al., 2022).

Outra abordagem é o pré-tratamento necessário nos materiais têxteis antes do processo de tingimento. Processos como MTIX (laser) e GRINP (plasma) são utilizados para fazer modificações na

superfície do substrato têxtil, permitindo que, durante o tingimento, o corante tenha maior facilidade de fixação e rendimento (Fashion for Good, 2023; Zille, 2020).

Relativamente ao tipo de corantes existentes no mercado, os corantes naturais são uma alternativa sustentável aos corantes convencionais na indústria têxtil. Como o próprio nome indica, são obtidos a partir de fontes naturais, como plantas, insetos ou minerais, e não contêm produtos químicos tóxicos (Che & Yang, 2022; Ellen MacArthur Foundation, 2021; Gomes & Soares, 2023; Lara et al., 2022).

Uma das principais vantagens dos corantes naturais é o facto de estes serem menos prejudiciais ao meio ambiente, isto é, ao contrário dos corantes sintéticos, que podem conter produtos químicos tóxicos e persistentes, os corantes naturais são biodegradáveis e não deixam resíduos químicos nocivos no meio ambiente. Isso contribui para a preservação dos ecossistemas aquáticos e terrestres, reduzindo a poluição da água e minimizando o impacto negativo nas cadeias alimentares. No entanto, é importante ressaltar que a utilização de corantes naturais também apresenta desafios. Por exemplo, a disponibilidade e a estabilidade dos corantes naturais podem variar dependendo da sazonalidade das plantas e/ou da qualidade dos insetos utilizados (Ahmed et al., 2020; Che & Yang, 2022; Ibrahim et al., 2020).

3.2.2. Produção | MAKE

A aplicação de técnicas de design sustentável tem sido adotadas pelas empresas com o objetivo de reduzir o desperdício do material têxtil. São exemplos o design modular, design para longevidade, design para a reciclabilidade, entre outros (Dahmani et al., 2021; Ellen MacArthur Foundation, n.d.; Henry B., 2023; Spreafico, 2022).

Na Figura 4 estão apresentadas algumas das principais estratégias para o design sustentável (Redress Design Award, 2023).

O design para baixo impacto envolve a utilização de materiais e processos que têm um impacto ambiental reduzido. Isto implica a escolha de matéria-prima renováveis, recicláveis ou biodegradáveis. Relativamente aos processos de produção, devem ser considerados aqueles que permitem reduzir, por exemplo, água e energia. A utilização de materiais duráveis e resistentes, bem como os aspetos/requisitos para a manutenção e reparabilidade do produto são critérios/requisitos para o design para a longevidade. O objetivo é desenvolver produtos duráveis e de alta qualidade, que possam ser usados por um longo período de tempo. Por outro lado, a escolha de materiais que possam ser facilmente

separados e reciclados são requisitos essenciais para o design para a reciclabilidade (Dahmani et al., 2021; Redress Design Award, 2023; Spreafico, 2022).

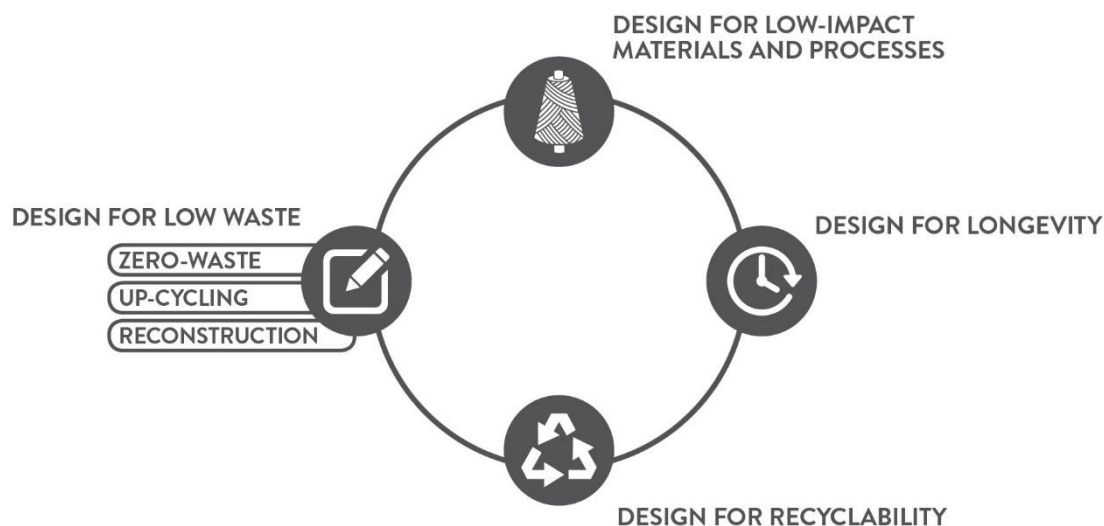


Figura 4 - Estratégias principais para o design circular (Redress Design Award, 2023).

O design para baixo desperdício (*low waste*) tem como objetivo minimizar o desperdício durante todo o ciclo de vida do produto, através do uso eficiente de materiais durante a produção, bem como a consideração de como o produto será descartado no final de sua vida útil - opções de reciclagem ou reutilização (Dahmani et al., 2021; Redress Design Award, 2023; Spreafico, 2022).

A utilização de cada um dos modelos apresentados na Figura 4 de forma individual ou combinada, é fundamental para a implementação de, por exemplo, modelos de design para a longevidade e durabilidade, refletindo diretamente na otimização dos outros dois modelos – design para baixo desperdício e design para a reciclabilidade (Coscieme et al., 2022). A aplicação das estratégias do design circular visam maximizar a eficiência do uso dos materiais têxteis. Estas práticas contribuem para uma indústria têxtil mais sustentável, com menor desperdício de materiais e menor impacto ambiental.

3.2.3. Consumo | USE

É importante que os benefícios económicos e ambientais de usar um produto têxtil durante mais tempo, bem como sensibilização sobre modelos de reparação e práticas de manutenção para durabilidade sejam promovidos. A utilização de materiais de qualidade, a seleção de acabamentos e processos adequados e a utilização de rótulos com instruções claras de manutenção e cuidados no produto final são características fundamentais para informar e sensibilizar o consumidor para que este possa tomar a decisão mais consciente no momento da compra (Coscieme et al., 2022).

Segundo o relatório lançado em 2017 pela WRAP (*The Waste and Resources Action Programme*), ao prolongar a vida útil de peças de vestuário por 9 meses teremos uma redução do impacto no consumo de energia, água e pegada de carbono entre 4-10%.

Atualmente, a estratégia de desenvolvimento de coleções de muitas marcas tem sido focada em designs intemporais (durabilidade física onde se considera o desenvolvimento de produtos resistentes a danos e ao desgaste) combinados com uma narrativa/*storytelling* (durabilidade emocional onde se considera a conveniência e necessidade do consumidor), por exemplo, ligada a iniciativas sociais e/ou envolvendo-se em projetos ambientais e criação parcerias com designers ou produtores. Esta é uma abordagem conseguida através da aplicação das estratégias de design sustentável apresentadas anteriormente, permitindo implementar ações para prolongar a longevidade e a durabilidade das suas peças de vestuário. Com o intuito de potenciar estas estratégias é necessária uma reorientação das de algumas estratégias para promover modelos de devolução, manutenção, substituição (quando necessário) e serviços de reparação. (Coscieme et al., 2022; WRAP, 2017).

Segundo relatório da *Textile Exchange*, 2023, são vários os modelos de negócio circulares que têm crescido ao longo dos últimos anos. Como se pode verificar na Figura 5 a alternativa com maior impacto é o aluguer de peças. Este negócio representa, em 2021, 70% do valor total de peças vendidas através de um modelo circular. Os modelos circulares relativos ao upcycling e *repair* representam 0.4% e 0.2%, respetivamente (Textile Exchange, 2023).

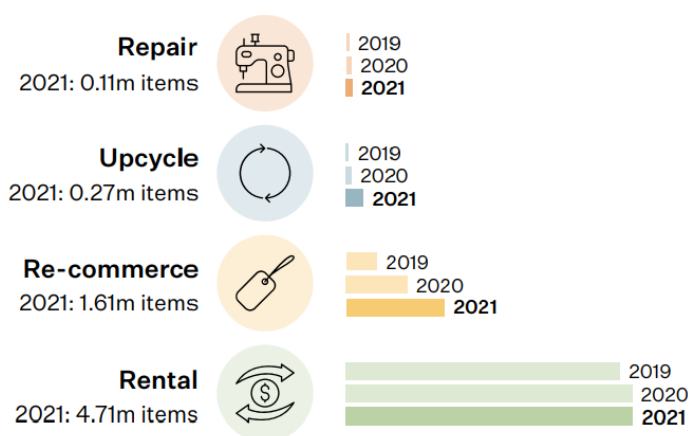


Figura 5 - Modelos de negócio circulares (Textile Exchange, 2023).

A utilização de sistemas digitais para o desenvolvimento de produto, por exemplo, CAD e CLO 3D, também tem sido utilizadas como suporte às estratégias de design já mencionadas, permitindo a mitigar a utilização de matéria prima, o consumo de energia e água alocados ao processo produtivo para desenvolvimento do produto (Ospital et al., 2022; Sayem, 2022).

3.2.4. Descarte | WASTE

Em 2017, um relatório realizado pela *Global Fashion Agenda* (GFA) refere que a pegada ambiental da Europa de 4 a 6%, é resultante do consumo de têxteis. A implementação de sistemas de gestão de resíduos mais eficientes é uma preocupação crescente na indústria têxtil, tendo em vista a redução do impacto ambiental e promover a circularidade.

A criação de sistemas para a recolha de produtos têxteis descartados, pré e pós consumo tem tido grande destaque nos últimos anos. Têm sido feitos esforços não só no que diz respeito à recolha de materiais têxteis, mas, principalmente, no que se refere à separação dos mesmos para que estes possam ser reutilizados ou reciclados. O principal objetivo é diminuir a quantidade de materiais que acabam, maioritariamente, em aterros sanitários. Ao fazer a recolha destes materiais têxteis descartados, sendo possível reutilizá-los ou reciclá-los, estamos a reintroduzi-los na cadeia de valor reduzindo, por exemplo, a necessidade de extração de matérias-primas virgens. Esta abordagem contribui para a redução do consumo de recursos naturais e a minimização do impacto ambiental associado à produção têxtil (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Segundo o relatório publicado pela *Ellen MacArthur Foundation*, 73% dos resíduos têxteis pós-consumo é incinerado ou depositado em aterro e somente 1% corresponde a reaproveitamento em circuito fechado, com a produção do mesmo tipo de artigos (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Na Figura 6, é possível verificar que apenas 12% é reciclado, sendo material obtido incorporado em artigos de menor valor (*downcycling*), como material de isolamento e enchimento. Existem ainda 12% de perdas associadas ao processo produtivo (pré consumo) e 2% de perdas no processo de recolha e tratamento do resíduo pós-consumo.

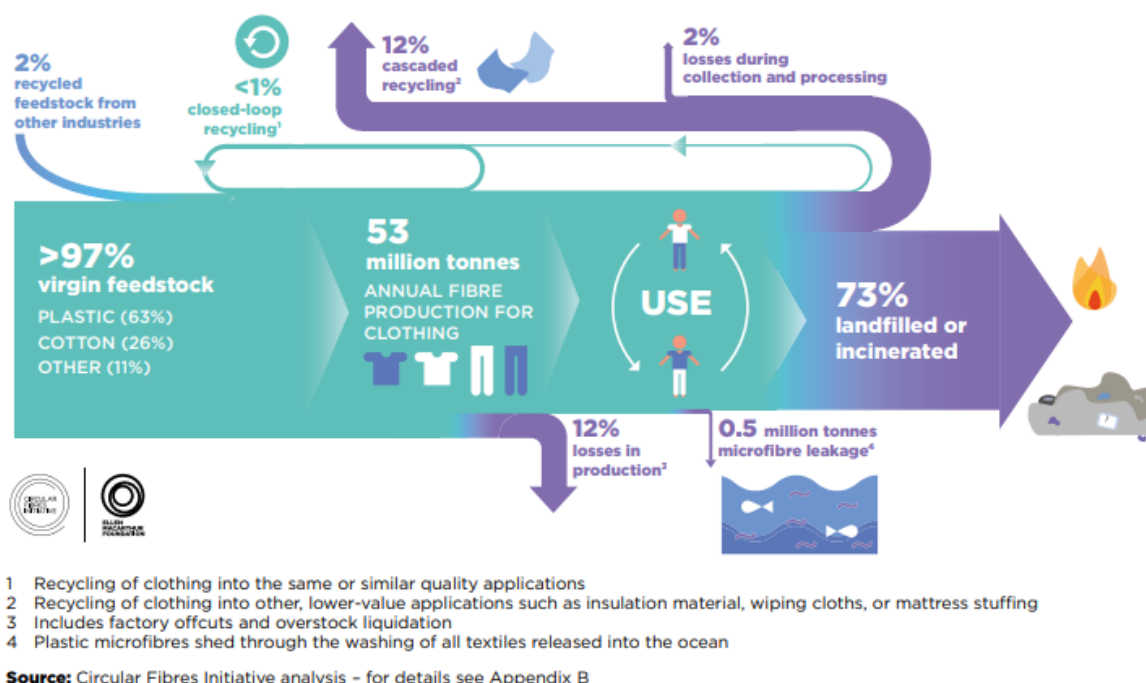
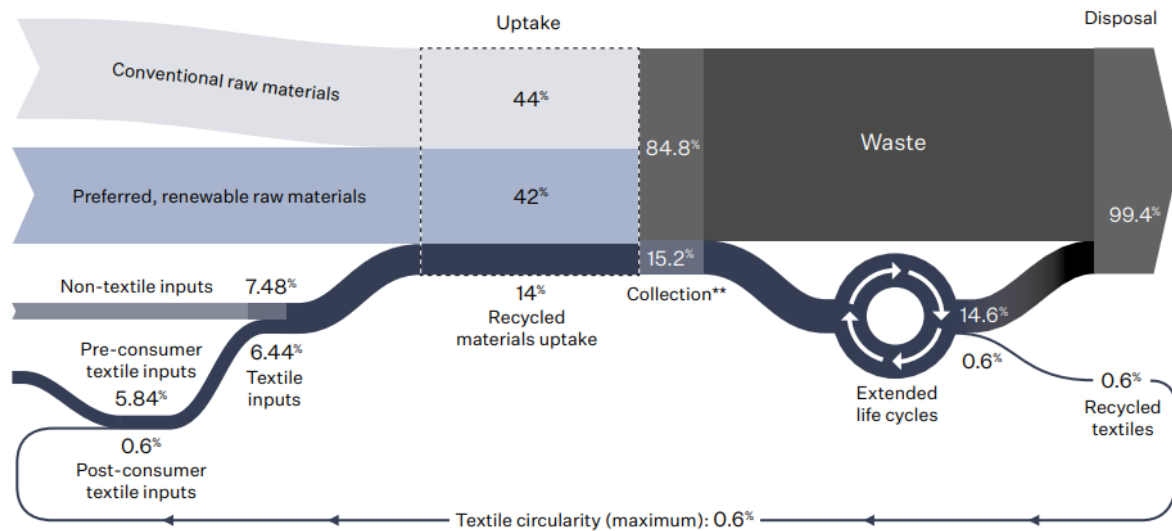


Figura 6 - Fluxo dos materiais têxteis em 2015 (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Em 2021 e 2022 a *Textile Exchange* publicou um relatório onde refere que o reaproveitamento, a nível mundial, em circuito fechado e reciclagem de pós-consumo, aumentou de 0,06% para 0,18% do uso total de materiais (8,623 toneladas) entre 2018 e 2020 e 0.6% do uso total de materiais (37,153 toneladas) entre 2018 e 2021 (Textile Exchange, 2022, 2023).

Na Figura 7 está apresentado o fluxo de matérias-primas abordado no relatório publicado em 2023. Através do diagrama (Diagrama de *Sankey*) é possível verificar uma divisão em 3 categorias principais: materiais convencionais (virgens) (44%), materiais renováveis (42%) e materiais reciclados (14%). Os materiais reciclados estão ainda divididos em resíduos têxteis e não têxteis (na sua maioria plásticos). Os materiais têxteis reciclados dividem-se em resíduos pré e pós consumo, sendo a fatia dos resíduos pós-consumo de 4% - dos 14.6% dos materiais recolhidos para reutilizar (estratégia dos 5R's), 0.6% não podem ser reaproveitados para outro fim a não ser a reciclagem (Textile Exchange, 2023).

Circular textile systems in 2021*



* Uptake: Based on 2022 MCI (2021 reporting cycle).

** Collection: EPA industry estimated recycling rate, 2017.

Source: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/textiles-material-specific-data>

Figura 7 - Fluxo de matérias-primas, incluindo pós-consumo (Textile Exchange, 2023).

Em 2022, a *McKinsey & Company*, publica um relatório, *Scaling textile recycling in Europe - turning waste into value*, onde refere que a reciclagem em circuito fechado, para materiais de resíduos têxteis pré e pós-consumo reciclados para produzir novos fios para novos tecidos/malhas, poderia ser aplicada a entre 18% a 26% dos resíduos têxteis brutos na Europa até 2030 (McKinsey Apparel, 2022) – Figura 8.

Empresas como a Renewcell, Ambercycle, Circ, Gr3n e Worn Again Technologies estão entre as mais importantes no que se refere à reciclagem de resíduos têxteis em novos produtos (Business of Fashion & McKinsey & Company, 2023).

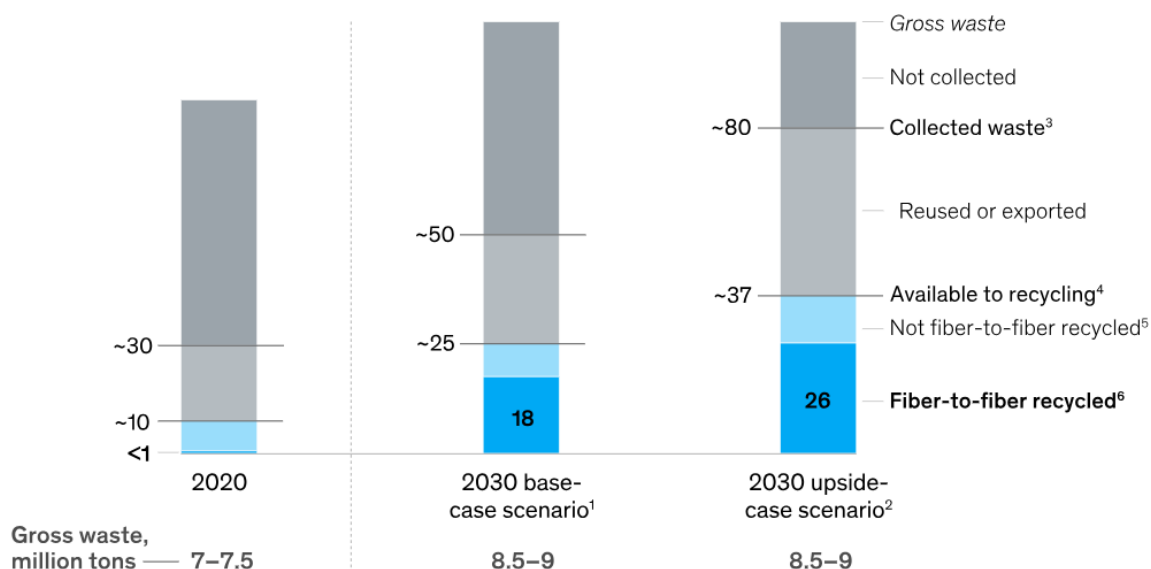


Figura 8 - Projeção da evolução da reciclagem de resíduos têxteis para 2030 (McKinsey Apparel, 2022).

Um dos casos mais bem-sucedidos em Portugal é a empresa Valérius 360° do Grupo Valérius. A Valérius 360° possui como principal matéria-prima resíduos de corte de confecção (pré-consumo em 100% algodão). A empresa faz a recolha desses resíduos nas confecções do Grupo Valérius, mas também de outras confecções que, efetivamente, têm interesse em contribuir de forma positiva para aquele que seria o destino final desse resíduo. É evidente que existem critérios que as confecções têm de adotar para fazer parte deste círculo, como a separação prévia por composição e cor. Posteriormente, após os resíduos serem entregues na Valérius 360 é feita uma análise para validação de matéria-prima a utilizar no processo que se segue.

Existem diferentes tipos de resíduos têxteis que são utilizados como matéria-prima. Quando os resíduos são provenientes da confecção de peças, ou seja, as sobras ou aparas estes denominam-se resíduos pré-consumo. Nesta categoria considera-se ainda peças que não podem ser vendidas ou usadas, por exemplo, peças com defeito, excesso de stock ou devoluções – são descartados antes de serem usados, são resíduos pré-consumo. Os resíduos pós-consumo são todos os materiais, vestuário que já foi usado, que estão desgastados, danificados e sem valor para os consumidores após a sua vida útil (European Commission, 2021; Juanga-Labayen et al., 2022; Utebay et al., 2023a; Wang, 2010). Na Figura 9 é apresentado o processo adotado pela Valérius 360° para a reciclagem dos materiais têxteis até à obtenção de fio. Com os desperdícios do processo, fibras muito curtas, a empresa utiliza as mesmas para a produção de papel.

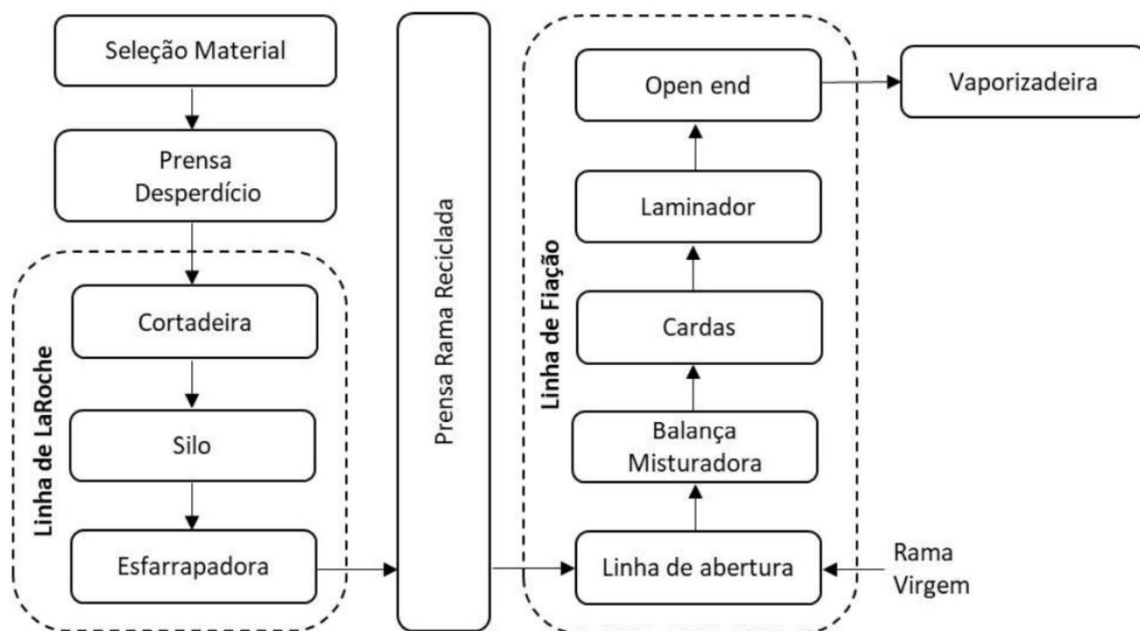


Figura 9 - Processo adotado pela Valérius 360° para a reciclagem dos materiais têxteis até à obtenção de fio (adaptado de Monteiro, 2020).

A indústria têxtil tem ainda procurado e adotado tecnologias avançadas de tratamento de água e efluentes para minimizar o impacto ambiental causado pelo consumo de água e pela geração de efluentes químicos.

Uma das principais abordagens para reduzir o impacto ambiental é investir em tecnologias de tratamento de água mais eficientes. Isso inclui a implementação de sistemas de filtragem avançados, tecnologias de osmose reversa, processos de tratamento biológico e outras soluções de tratamento de água. Essas tecnologias permitem remover contaminantes e produtos químicos dos efluentes, tornando a água residual mais limpa e segura para descarte ou reutilização.

A reciclagem de água também é uma prática que tem vindo a ser adotada pela indústria têxtil. Após o tratamento adequado, a água residual pode ser reciclada e reutilizada em etapas posteriores do processo, minimizando a quantidade de água descartada como efluente. A reciclagem de água também contribui para a conservação dos recursos hídricos e para a redução do consumo total de água pela indústria têxtil.

Estas inovações estão a impulsionar a indústria têxtil em direção à circularidade, reduzindo a dependência de recursos naturais e minimizando o desperdício.

3.3. Desafios e Oportunidades

A transição para uma indústria têxtil mais circular apresenta desafios significativos, como a complexidade da cadeia de fornecimento, a falta de infraestrutura para a reciclagem de têxteis e a necessidade de mudanças nos padrões de consumo. No entanto, também há oportunidades para a inovação, a redução de custos e a criação de valor sustentável.

Várias têm sido as medidas e iniciativas discutidas e implementadas a nível europeu durante os últimos anos – Figura 10. Estas medidas visam transformar o setor têxtil num setor mais sustentável, promovendo a circularidade dos produtos têxteis, minimizando seu impacto ambiental.



Figura 10 - Medidas e iniciativas discutidas e implementadas a nível europeu durante os últimos anos.

Em dezembro 2019 várias medidas e iniciativas culminaram com a implementação do Acordo Verde Europeu / Pacto Ecológico Europeu com o objetivo de promover a sustentabilidade e a transição para uma economia verde na União Europeia (COMISSÃO EUROPEIA, 2019). Na Figura 11 está apresentado o roteiro de princípios fundamentais do Pacto Ecológico, que tem como objetivo atingir a neutralidade climática até 2050, retardando o aquecimento global e mitigando os seus efeitos

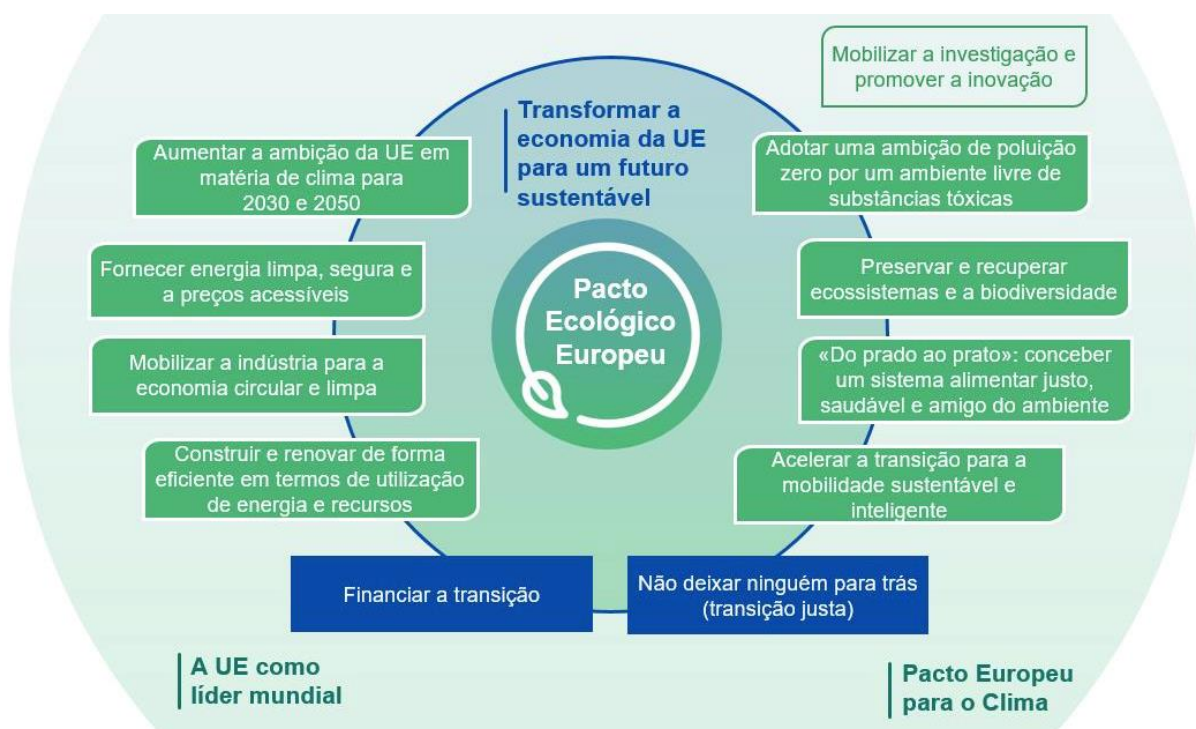


Figura 11 - roteiro de princípios fundamentais do Pacto Ecológico Europeia (COMISSÃO EUROPEIA, 2019).

Para cumprir com esse objetivo foram definidas algumas métricas (Comissão Europeia, 2019):

- Redução das emissões de gases de efeito estufa: Metas ambiciosas foram estabelecidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990.
- Energias renováveis: Aumento significativo da participação das energias renováveis na matriz energética da União Europeia, com o objetivo de alcançar pelo menos 32% de participação de fontes renováveis até 2030.
- Eficiência energética: Melhoria da eficiência energética em todos os setores, com o objetivo de atingir uma redução de pelo menos 32,5% no consumo de energia primária até 2030.

Em 2020, a Comissão Europeia promoveu um novo Plano de Ação para a Economia Circular (PAEC) (*Circular Economy Action Plan – CEAP*), como uma iniciativa-chave do Pacto Ecológico Europeu. O objetivo deste plano é impulsionar a economia linear, baseada numa produção e consumo lineares, para uma economia circular, que visa maximizar o valor dos recursos, reduzindo o desperdício e promovendo a sustentabilidade. O PAEC estabelece uma série de ações e medidas incluindo (Comissão Europeia, 2020):

- Redução do desperdício - o PAEC tem como objetivo reduzir significativamente o desperdício e promover a utilização eficiente de recursos, visando a diminuição da extração de matérias-primas e a minimização dos impactos ambientais associados.
- Reciclagem e reutilização / garantir diminuição de resíduos - estabelecer metas para a reciclagem de resíduos e à sua transformação em recursos secundários de elevada qualidade. Propõe ainda medidas destinadas a reduzir ao mínimo as exportações de resíduos da UE.
- Design sustentável / Capacitar o Consumidor - promover o design para a durabilidade, reparação e reciclagem dos produtos, com o objetivo de reduzir o desperdício o tempo de vida útil dos produtos. Os consumidores terão acesso a informações fiáveis sobre questões como a reparabilidade e a durabilidade dos produtos, permitindo que estes possam fazer escolhas mais sustentáveis.
- Setores-Chave (setores que utilizam a maior parte dos recursos e em que o potencial para a circularidade é elevado) - O plano identifica setores estratégicos, como têxtil, eletrónicos, plásticos e alimentos, que têm um grande impacto ambiental, e promove medidas específicas para melhorar a circularidade nesses setores, como a redução do uso de materiais virgens e o estímulo à reciclagem.

Durante o ano 2022, várias propostas, medidas e iniciativas do PAEC foram adotados (Comissão Europeia, 2022b).

A Estratégia da UE em prol da Sustentabilidade e Circularidade dos Têxteis propõe medidas para todo o ciclo de vida dos produtos têxteis, apoiando simultaneamente as transições ecológica e digital do ecossistema. Algumas das medidas incluídas são (Comissão Europeia, 2022a):

- Criação de requisitos de design aplicáveis aos têxteis, com o objetivo de os tornar mais sustentáveis desde a sua conceção.
- Fornecer informações mais claras sobre os têxteis e desenvolvimento de um passaporte digital de produto, que permitirá aos consumidores conhecerem melhor a origem, a composição e o impacto ambiental dos produtos têxteis.
- Implementação de medidas para combater a libertação não intencional de microplásticos provenientes dos têxteis, com o objetivo de reduzir a poluição ambiental.

- Definição de regras harmonizadas da UE em relação à responsabilidade alargada do produtor de têxteis, bem como a implementação de incentivos económicos para tornar os produtos mais sustentáveis.
- Apoio à investigação, inovação e investimentos no setor têxtil, com o objetivo de promover o desenvolvimento de soluções tecnológicas e práticas sustentáveis.

2023 é o ano em que a Comissão Europeia lança uma atualização do quadro de monitorização da economia circular com o objetivo de proporcionar uma visão geral, medindo os benefícios diretos e indiretos do aumento da circularidade. Este novo quadro é composto por 11 indicadores agrupados em 5 áreas (Comissão Europeia, 2023):

- Produção e consumo: abrange indicadores relacionados com a eficiência no uso de recursos, como a produtividade dos materiais - mede a percentagem do PIB resultante da utilização de materiais e traduz o grau de eficiência da utilização de materiais na produção de bens e serviços (€/kg), a eficiência energética e a pegada de carbono (toneladas por habitante).
- Gestão de resíduos: são considerados indicadores relacionados com a gestão adequada de resíduos, incluindo a taxa de reciclagem, a redução de resíduos e a recuperação de materiais.
- Matérias-primas secundárias: avalia a utilização de matérias-primas secundárias, como a quantidade de materiais reciclados incorporados em produtos ou a utilização de materiais renováveis.
- Competitividade e inovação: são considerados indicadores relacionados com a competitividade económica e inovação no contexto da economia circular, como o investimento em investigação e desenvolvimento de patentes relacionadas com a gestão de resíduos e a reciclagem.
- Sustentabilidade global e resiliência: abrange indicadores que avaliam os impactos da economia circular na sustentabilidade global, incluindo a redução das emissões de gases de efeito estufa, a preservação da biodiversidade e a melhoria da resiliência dos sistemas.

Estes indicadores permitem acompanhar o progresso, identificar áreas de melhoria e monitorizar os impactos positivos promovidos pela transição para uma economia circular.

Organizações como a Comissão Europeia, WBSCD (*World Business Council for Sustainable Development*), a Fundação Ellen MacArthur, entre outros, tem feito esforços no que se refere à criação de indicadores para medir a circularidade, no entanto, essas abordagens ainda estão em fase de desenvolvimento não abordando todos os aspectos da circularidade de forma abrangente (Daglis et al., 2023).

Alguns dos desafios que a indústria têxtil enfrenta na procura de uma transição para uma economia mais circular, bem como as oportunidades que surgem dessa transição são apresentados de seguida – Tabela 2.

Apesar de toda a informação, estratégias e métricas que têm sido divulgadas relativamente à economia circular, não existe ainda uma escala cabal e de implementação geral que permita medir a verdadeira circularidade de um material (Elia et al., 2017; Geissdoerfer et al., 2017).

Tabela 2 - Desafios e oportunidades (do autor).

Desafios		Oportunidades	
Complexidade na cadeia de valor	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir a rastreabilidade e a recuperação de materiais pode ser desafiador devido à falta de transparência e à complexidade das relações entre todos os intervenientes. - Diversidade de materiais utilizados na indústria têxtil - ampla variedade de fibras, como algodão, poliéster, viscose, entre outras. - Cada tipo de fibra tem características diferentes e requer processos de recuperação e reciclagem específicos. 	Inovação Tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> - Fortalecer a colaboração entre os intervenientes da cadeia de fornecimento têxtil - parceria, como programas de certificação e rastreabilidade, que promovam a transparência e a responsabilidade em toda a cadeia. - Recuperação de materiais e implementar práticas de reciclagem ou reutilização - Métodos avançados de separação por cor, composição química ou propriedades físicas têm sido explorados para facilitar a reciclagem de mistura de fibras.
Falta de infraestruturas para reciclagem de têxteis	A recolha, separação e processamento de diferentes tipos de fibras têxteis requerem tecnologias avançadas e instalações especializadas, que nem sempre estão disponíveis em larga escala.	Redução de custos	<ul style="list-style-type: none"> - Em vez de depender exclusivamente de matérias-primas virgens, as empresas podem recuperar e reutilizar fibras de produtos têxteis descartados reduzindo a necessidade de adquirir nova matéria-prima e, por sua vez, reduzindo o custo na aquisição desses materiais. - A reciclagem de materiais é um exemplo onde diferentes empresas podem criar uma cadeia de fornecimento fechada e integrada, onde os resíduos de uma empresa podem se tornar matérias-primas da outra.

Tabela 2 - Desafios e oportunidades (continuação).

Desafios	Oportunidades
----------	---------------

<p>Mudança nos padrões de consumo</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzir o consumo excessivo de produtos têxteis - Consumidores podem ser incentivados a comprar menos, mas com maior qualidade, optando por produtos duráveis e de maior valor. - Adoção de práticas de cuidado adequadas para prolongar a vida útil dos produtos têxteis. 	<p>Criação de valor</p>	<ul style="list-style-type: none"> - As empresas podem desempenhar um papel importante ao oferecer opções mais sustentáveis e transparentes aos consumidores, além de educar sobre os impactos ambientais da indústria têxtil. - Melhorar a qualidade dos produtos: Investir em materiais de alta qualidade e técnicas de produção eficientes pode resultar em produtos mais duráveis e menos propensos a desgaste. - Conscientizar acerca dos cuidados adequados dos produtos, por exemplo, lavagem correta, pode ajudar a prolongar sua vida útil.
---------------------------------------	--	-------------------------	---

3.4. Medição de Impacto: Análise do Ciclo de Vida

A avaliação da circularidade de um material envolve múltiplos aspetos, como a eficiência do uso de recursos, a durabilidade do material, a reciclabilidade, a reincorporação na cadeia de produção e a minimização de impactos ambientais. Segundo estudo realizado, por Elia Valerio et al (2017), a medição da circularidade pode ser suportada por 4 áreas: monitorização de processos, ações envolvidas, requisitos a ser medidos e, finalmente, implementação.

Atualmente, existem várias abordagens e indicadores propostos para medir a circularidade. Alguns exemplos incluem índices de circularidade, pegada de recursos, análise de ciclo de vida (ACV), avaliações de eco-design, entre outros.

O Eco-design envolve a integração de aspetos ambientais no processo de design do produto. Envolve a medição e compreensão dos impactos dos produtos existentes, a inclusão de metas ambientais durante o desenvolvimento do produto e a comunicação eficiente dos benefícios ambientais alcançados – inclui a seleção de materiais (por exemplo, utilização de materiais recicláveis), a escolha dos processos de produção (por exemplo, no que diz respeito a resíduos e emissões), o tratamento no fim de vida (ou seja, reparo e reciclagem) (Islam et al., 2022; Taieb & Amor, 2023).

A medição do impacto ambiental e social é fundamental para avaliar a circularidade na indústria têxtil. Métodos como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode fornecer uma visão abrangente dos impactos ao longo do ciclo de vida do produto têxtil, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. No contexto da indústria têxtil, a ACV pode ser usada para analisar o consumo de recursos naturais, como água e energia, as emissões de gases de efeito estufa, a toxicidade de produtos químicos utilizados, a geração de resíduos e outros impactos ambientais.

De acordo com a norma ISO 14040:2008 e 14044:2008 a avaliação do ciclo de vida é possível identificar:

- oportunidades para a melhoria no o desempenho ambiental dos produtos nas diferentes fases do ciclo de vida;
- definição de prioridades para otimização de produtos ou processos - pode ajudar na tomada de decisão e impulsionar a adoção de práticas mais sustentáveis e circulares na indústria têxtil;
- definição de indicadores de desempenho ambiental relevantes, incluindo métodos de medição;

- o marketing - única forma de convenceremos a indústria a optar por matérias-primas e processos mais sustentáveis, com a apresentação de dados específicos e reais, sobre os custos e benefícios de cada produto e/ou processo.

A utilização de métodos como a ACV é fundamental para avaliar a circularidade na indústria têxtil, permitindo uma compreensão mais completa dos impactes ambientais e sociais ao longo do ciclo de vida do produto.

Considerando a economia circular na indústria têxtil, existem alguns modelos de negócio que podem ser adotados, sendo a reciclagem e a recuperação de materiais aquele que tem maior foco na atualidade dado as métricas para a reciclagem de têxteis para 2030.

4. ENQUADRAMENTO DO PROCESSO E PRODUTO

No processo produtivo do setor têxtil, os processos são correlativos, no sentido em que o produto final de um processo corresponde, geralmente, à matéria-prima do processo seguinte.

O processo de produção têxtil apresenta quatro processos principais: fiação, produção de tecido/malha (tecelagem ou tricotagem), ultimação (tinturaria, acabamento e estamparia) e confecção.

4.1. Descrição do Processo Produtivo

Na Figura 12 estão ilustradas as fases do processo têxtil a considerar para este estudo. A etapa de corte e confecção, distribuição, fase do uso e o fim de vida não foram avaliadas nem consideradas no âmbito do presente estudo.

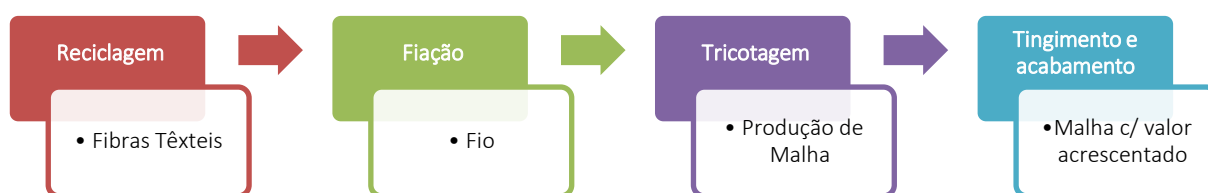


Figura 12 – Etapas do processo têxtil a considerar para o caso de estudo.

A reciclagem de materiais têxteis é uma área em rápido crescimento na indústria têxtil. Com o objetivo de reduzir o desperdício e promover a circularidade, tecnologias avançadas têm sido desenvolvidas para separar e processar diferentes tipos de fibras têxteis, permitindo a recuperação de materiais a partir de produtos têxteis descartados. Ao reciclar materiais têxteis, reduzimos a necessidade de utilizar matérias-primas virgens, como algodão ou poliéster, que requerem recursos naturais e energia para a produção. Adicionalmente, a reciclagem de fibras têxteis ajuda a reduzir o volume de resíduos têxteis enviados para aterros, contribuindo para a redução do impacto ambiental.

4.1.1. Reciclagem e produção do fio

A reciclagem envolve a recolha de produtos têxteis usados, como resíduos dos processos produtivos, roupas, tecidos, malhas e outros materiais têxteis, e sua transformação em novos materiais. Existem várias etapas envolvidas no processo de reciclagem de têxteis, incluindo a separação, o processamento e a transformação dos materiais. A primeira etapa é a separação dos diferentes tipos de fibras presentes nos produtos têxteis descartados. Isso pode ser feito através de um processo mecânico, a desfiação, que separa as fibras dos tecidos/malhas/roupas em componentes individuais. No entanto,

também podem ser utilizados métodos químicos e enzimáticos para facilitar a separação das fibras. Esta etapa é realizada para remover impurezas, cor e acabamentos químicos, garantindo a qualidade das fibras recicladas. Uma vez que as fibras foram separadas e processadas, elas podem ser transformadas em novos materiais, através de processos de fiação, tecelagem ou tricotagem, que transformam as fibras em fios e, posteriormente, em tecidos ou malhas.

4.1.1.1. Reciclagem Valérius 360

O processo da Valérius 360 inicia-se com a triagem do desperdício têxtil. No caso de ser desperdício pré-consumo (desperdícios de corte de confecção), este desperdício é entregue na empresa de reciclagem separado por cor, e composição sendo que o material têxtil deve ser composto por 100 % algodão. No caso de ser resíduo pós-consumo, como é necessário fazer a separação dos adereços das peças (botões, fechos, linhas, entre outros) são empresas de *sorting* que fazem essa separação, entregando na Valérius 360 o desperdício devidamente separado e identificado. Posteriormente é prensado originando um fardo.

No momento da colocação de uma encomenda por parte de um cliente, faz-se uso dos fardos de desperdício e estes seguem para a linha de LaRoche – inclui a cortadeira, câmara de amaciamento e a esfarrapadeira. Esta linha inicia-se com a cortadeira onde o desperdício de malha é cortado horizontalmente e verticalmente. Posteriormente, a malha cortada é alimentada a uma câmara onde é adicionado um amaciador (câmara de amaciamento) onde passa aproximadamente 4 a 5 horas, e é depois encaminhada para a esfarrapadeira. Nesta etapa a malha cortada é esfarrapada por tubos rotativos com dentes de espessura diferente de forma consecutiva sendo, no final, obtida a malha reciclada. Esta malha pode ser armazenada em fardos ou pode ser diretamente utilizada na linha de fiação.

Na linha de fiação:

- 1.** Os fardos passam pela linha de abertura onde se procede à limpeza, removendo contaminantes, libertando grande parte dos emaranhados de fibras, neps.
- 2.** Na balança misturadora procede-se à mistura dos vários tipos de fibra virgem e reciclada, sendo a mistura obtida enviada para as cardas, as quais compactam o material, originando uma fita, que é acondicionada em latões.
- 3.** A regularização da fita gerada previamente nas cardas é realizada nos laminadores. Esta regularização consiste no controlo da grossura da fita e na paralelização das fibras que compõem a mesma, obtendo-se uma nova fita mais paralelizada, uniformizada e misturada.

Para a fiação propriamente dita, nesta unidade fabril, é utilizada a técnica de fiação *Open end* – por rotor.

4. Fiação inicia-se com a alimentação da fita obtida no laminador à máquina de fiação. O fio produzido é enrolado diretamente num cone, seguindo depois para a vaporizadora, onde se submete o fio obtido a temperatura e a humidade elevadas, para fixar a sua forma.

4.1.2. Produção de Malha

A tricotagem, tal como a tecelagem, consiste em processos mecânicos onde se procede ao entrelaçamento dos fios através de teares.

O processo de tricotagem é realizado recorrendo a um só sistema de fios que formam laçadas, que são entrelaçadas umas nas outras, originando malhas de trama, ou que cruzam diferentes fios entre si, o que resulta na produção de malhas de teia em teares circulares.

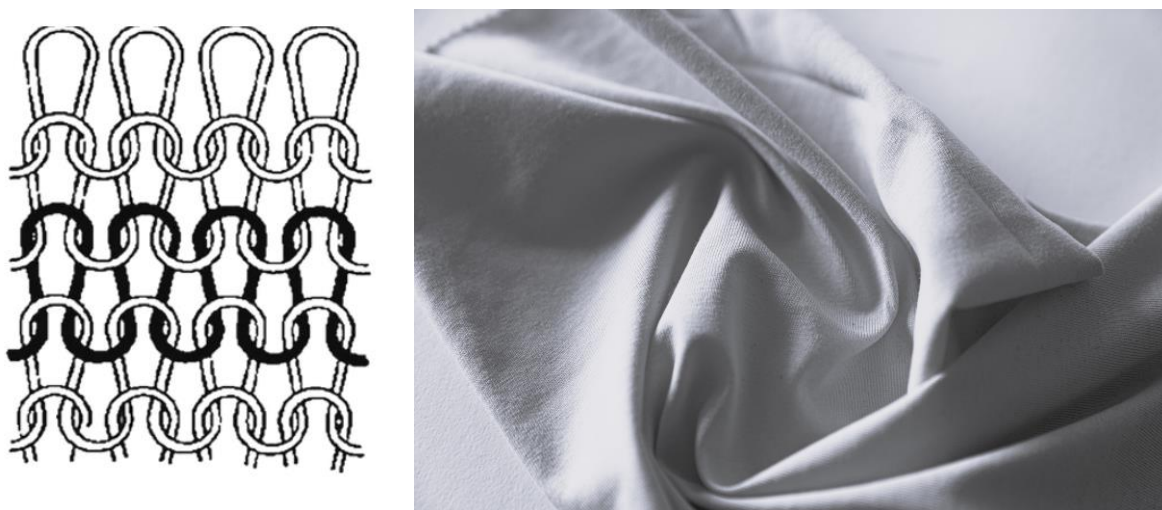


Figura 13 - Jersey simples: a) esquema representativo de tricotagem (Fouda, Abdelmonem & EL-Hadidy, Adwl & El-Deeb, A.. (2015)); b) malha obtida.

4.1.3. Enobrecimento Têxtil

A ultimação tem por finalidade acrescentar valor ao produto e melhorar a sua qualidade final. Neste processo, podemos considerar as seguintes etapas:

Tratamento prévio ou preparação – eliminação das impurezas do substrato têxtil, com o intuito de melhorar a estrutura do material tornando-o mais apto para as operações posteriores;

Tingimento – método que permite a coloração do substrato têxtil de modo uniforme. Dependendo do tipo de fibra ou resultado estético final pretendido, o corante e tipo de processo de tingimento pode variar;

Acabamento – consiste em operações de estabilização do substrato têxtil, podendo ainda ser utilizado para conferir propriedades específicas ao produto, como a resistência, brilho e funcionalização.

4.2. Especificações do produto

Este estudo focou então o desenvolvimento de um material têxtil, com uma mistura de fibras 60% algodão orgânico, 20% algodão pré-consumo e 20% algodão pós-consumo, utilizando um fio de Ne 20/1, para a obtenção de um Jersey de 215 g/m². Assim, na Tabela 3 encontram-se os detalhes associados aos parâmetros do produto desenvolvido.

Tabela 3 – especificações técnicas do produto RDD1389-ML.

Referência de produto	RDD1389-ML
Estrutura	Jersey
Composição	60%algodão orgânico / 20%algodão reciclado pré-consumo/ 20%algodão reciclado pós-consumo
Massa por unidade de área (g/m²)	215 (+/-5%)
Largura (m)	1.65 (+/-5%)
Estabilidade Dimensional NP EN ISO 6330 (40°C line dry)	Comprimento ± 7% Largura ± 7 %
Espiralidade NP EN ISO 16322-2 (40°C line dry)	3 % max
Pilling Box NP EN ISO 12945-1 (11000 rot)	3

4.3. Avaliação do ciclo de vida

4.3.1. Enquadramento

O presente estudo surge de uma necessidade de compreender o desempenho e impacto ambiental do produto desenvolvido, considerando cada uma das fases do ciclo têxtil, ou seja, da cadeia de valor desde a obtenção da fibra até à obtenção de malha acabada.

A análise do ciclo de vida (ACV) do produto, realizada segundo a ISO 14040, baseia-se numa compilação de avaliação das entradas e saídas do processo, usadas para a quantificação dos potenciais impactes ambientais associados ao ciclo de vida de um sistema de produto. Adicionalmente foram também considerados os requisitos estabelecidos nas instruções gerais do sistema EPD internacional.

Como se pode ver na Figura 14 deverá existir uma interação constante entre a etapa da interpretação e as restantes etapas para verificar se o estudo vai de encontro aos objetivos inicialmente previstos ou se será necessária alguma reformulação dos mesmos. Tratando-se este de um estudo de avaliação de ciclo de vida de um produto em desenvolvimento, a fase da interpretação é de extrema importância.

Inicialmente, procedeu-se a uma primeira definição do objetivo e âmbito do estudo de avaliação de ciclo de vida para cada uma das Atividades Nucleares (AN), descritos nas secções abaixo. Posteriormente, procedeu-se à recolha dos dados do inventário do ciclo de vida durante os ensaios industriais, contemplando todas as entradas e saídas dos sistemas.

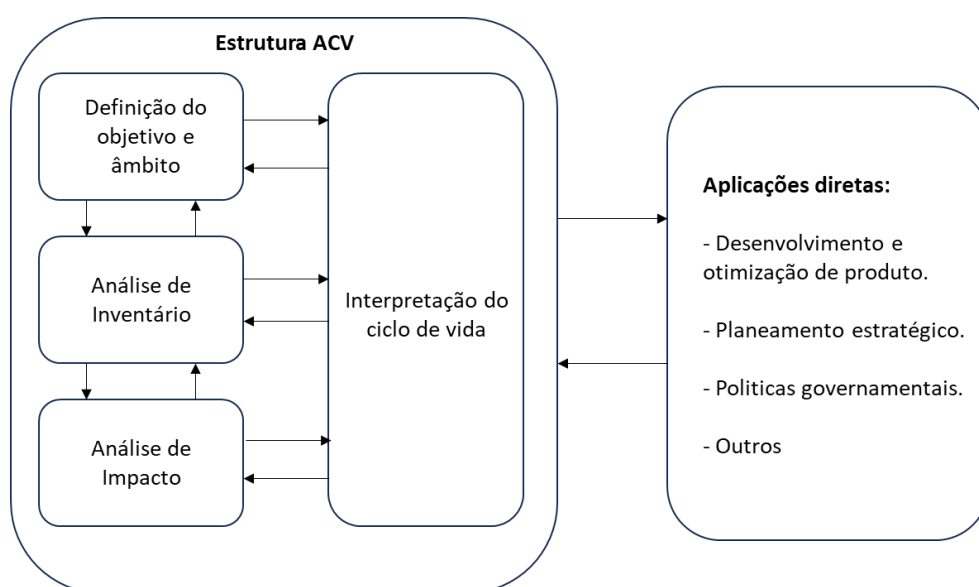


Figura 14 - Estrutura e aplicações da ACV.

A partir dos dados recolhidos no inventário foram determinados os indicadores ambientais mais relevantes para o processo em análise: consumo de energia elétrica, consumo de combustíveis, consumo de água, consumo de produtos químicos, emissões para o ar, emissões para a água e produção de resíduos.

A contabilização dos impactes associados ao processo identificado acima foi realizada usando o software SimaPro, versão 9.1.1.1., e a metodologia usada para a avaliação dos impactes foi o método EPD (2018) versão v1.01. A base de dados utilizada foi a do ecoinvent (versão 3.8, 2021).

4.3.1.1. Categorias de Impacte Ambiental

A metodologia EPD (2018), versão v1.01, avalia oito categorias de impacto ambiental. No âmbito deste estudo, foram então consideradas todas estas categorias, identificando-se:

- Potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential (GWP)*) – impacto dos gases de efeito de estufa na alteração da temperatura. O resultado do impacto ambiental desta categoria é expresso em massa de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂ eq.).
- Potencial de depleção da camada do ozono (*Ozone Depletion Potential (ODP)*) – define o potencial de destruição da camada do ozono para diferentes gases, expressos em massa de Clorofluorcarbonetos equivalente (kg CFC-11 eq.).
- Potencial de Acidificação (*Acidification Potential (AP)*) – relativa à deposição de substâncias ácidas no ar, água e solo. O impacto associado é expresso em massa de dióxido de enxofre equivalente (kg SO₂ eq.).
- Potencial de Eutrofização (*Eutrophication Potential (EP)*) – reflete os efeitos de nitrificação, resultantes da adição de nutrientes ao solo. O resultado do impacto ambiental desta categoria é expresso em massa de ião fosfato equivalente (kg PO₄³⁻ eq.).
- Potencial de formação de oxidante fotoquímico (*Photochemical Oxidant Formation Potential (POFP)*) – O resultado do seu impacto ambiental é expresso em massa de compostos orgânicos voláteis não metânicos equivalente (kg NMVOC eq.).
- Potencial de depleção abiótica – Elementos e recursos fósseis (*Abiotic Depletion Potential – Elements (ADP-E) & Fossil resources (ADP-FR)*) – é um indicador do consumo de recursos não renováveis. Este indicador pode ser expresso em megajoules (MJ), sendo este resultado referente à utilização de recursos fósseis. Também pode ser expresso em massa de antimónio equivalente (kg Sb eq.), sendo neste caso, referente à extração de minerais.
- Potencial de escassez de água (*Water Scarcity Potential (WSP)*) – o impacto ambiental é expresso em volume de água equivalente (m³ H₂O eq.).

Este método compreende uma compilação de várias metodologias, sendo usado para a criação de Declarações de Produto Ambientais (EPD), conforme publicado no site do *Swedish Environmental Management Council* (SEMC). As EPD são desenvolvidas de acordo com as regras de categoria de produto (PCR).

4.3.2. Definição da unidade funcional

A definição da unidade funcional é uma das etapas mais importantes num estudo de ACV, uma vez que, os impactes ambientais de um produto são calculados em função da unidade funcional.

A avaliação do ciclo de vida foi realizada no produto RDD1389-ML e, posteriormente, comparado com outras análises existentes para produtos similares em que a diferença entre eles reside no processo de obtenção da matéria-prima (fibra).

Desta forma foi necessário adequar a quantidade em quilos de algodão utilizado em cada etapa para a produção do produto RDD1389-ML. Neste estudo, a unidade funcional definida é 1kg de malha acabada.

4.3.3. Fronteiras do Sistema

No presente estudo, foi considerada uma abordagem “cradle-to-gate” que inclui todos os processos, desde o cultivo do algodão (matéria-prima) até ao acabamento da malha desenvolvida (produto final).

As fronteiras foram divididas em três partes (*Upstream, Core e Downstream*) tal como representado na Figura 15.

Uma vez que, a etapa do cultivo do algodão orgânico não se realiza no Grupo Valérius, esta pertence ao *Upstream*. Os processos incluídos no *Downstream*, como o caso do corte e confeção, transporte para o cliente final (consumidor), não foram considerados neste estudo. A exclusão destas etapas de *Downstream*, devem-se ao facto de o presente estudo se focar nas etapas relativas ao processo de desenvolvimento de malha, principal produto têxtil comercializado pela RDD Textiles.

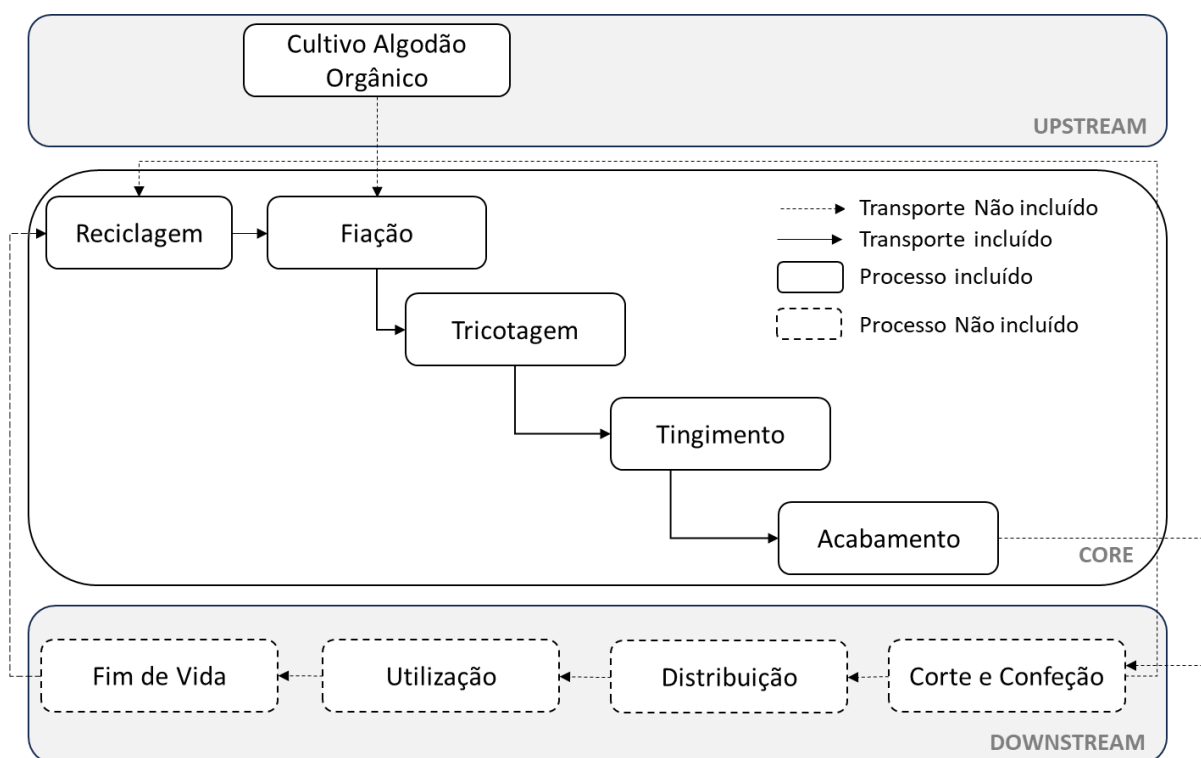


Figura 15 – Descrição das fronteiras do sistema do produto.

4.3.4. Inventário

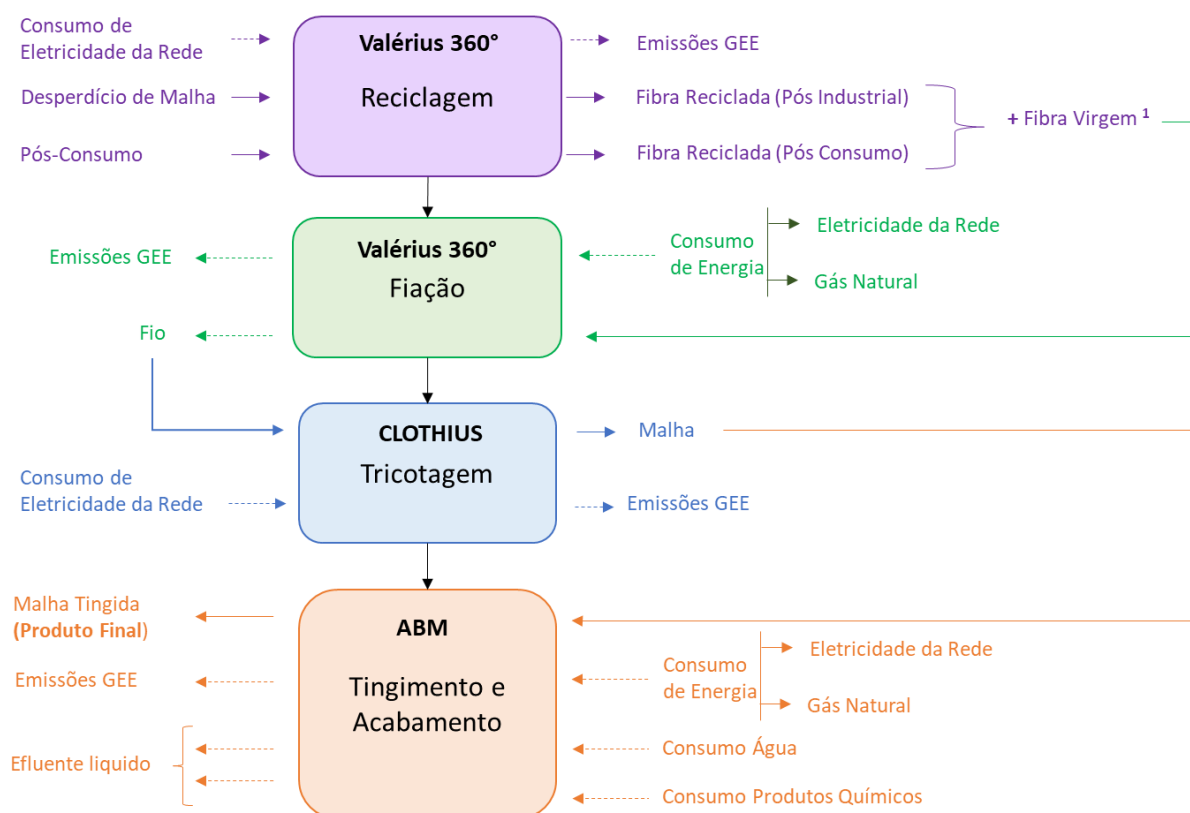
Na Figura 16 é apresentado o fluxo de entradas e saídas em cada fase do processo de desenvolvimento do produto em estudo. Este fluxograma apenas considera os processos *CORE* definido na Figura 15 (fronteiras) – processos que decorrem nas empresas do universo Valérius.

O processo de reciclagem e fiação do algodão ocorre na Valérius 360°, através de um conjunto de operações mecânicas, necessárias à transformação das fibras recicladas em fio. Após a produção do fio Ne 20/1, este é encaminhado para a Clothius – Tecelagem, Lda.

A tricotagem, processo de transformação mecânica, realizada num tear circular, utiliza o fio produzido na Valérius 360 e através de um sistema agulhas, produz laçadas obtendo-se a malha. Posteriormente, o rolo de malha é transportado para a António Barroso Malhas, Lda (ABM), que onde são realizados os processos de tingimento e acabamento da malha.

O tingimento é um processo químico que confere uma cor aos materiais têxteis, utilizando corantes, pigmentos e auxiliares. Neste processo, quanto mais escura for a cor pretendida para o produto, mais produtos químicos, água, energia e tempo serão necessários. Do acabamento, fazem parte os processos de secagem e ramulagem. Após este processo, a malha é avaliada pelo departamento de controlo de qualidade.

A realização do inventário deste estudo foi, sempre que possível, efetuada através de informação diretamente fornecida por parte das várias empresas do Grupo Valérius anteriormente identificadas – Valérius 360°, Clothius e ABM, sendo completada por dados bibliográficos em caso de lacunas de informação.



¹ A mistura de fibras tem de possuir um míni de 20% de fibra virgem.

Figura 16 – Fluxograma de entradas e saídas ao longo do processo produtivo.

Uma vez que todo o inventário deve ser reportado à unidade funcional, foi necessário definir o fluxo de materiais, de modo a identificar as entradas e saídas de cada processo, relativas à quantidade de matéria-prima necessária para produzir 1kg de malha Jersey – Figura 17.

As considerações tomadas para o cálculo das perdas em cada uma das fases do ciclo de vida da malha Jersey, encontram-se detalhadas no inventário correspondente a cada processo– Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8. Realça-se que, à exceção do resíduo da fiação, os resíduos de malha produzidos na tecelagem são todos encaminhados para a unidade Valérius 360°, para posterior processo de reciclagem têxtil pré-consumo.

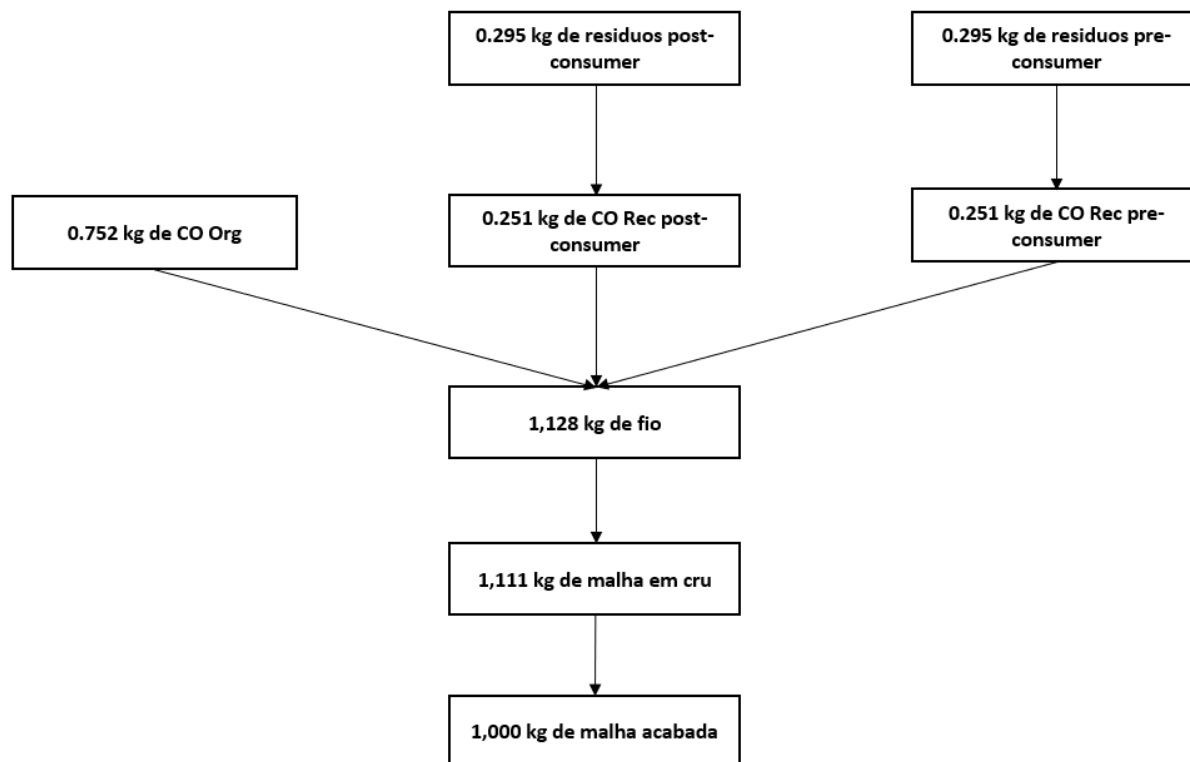


Figura 17 – Balanços de massa com foco na matéria-prima usada nos processos do ciclo da malha desenvolvida, 60% algodão orgânico, 20% algodão reciclado pré-consumo e 20% algodão reciclado pós-consumo, e avaliada no presente estudo.

4.3.4.1. Produção das fibras de Algodão

O inventário da produção das fibras de algodão orgânico foi definido considerando a base de dados do *ecoinvent v3.8*, uma vez que, não foi possível obter dados por parte do fornecedor – Tabela 4.

Tabela 4 – Inventário processo de produção do algodão orgânico proveniente da base de dados ecoinvent (versão 3.8, 2021).

Entradas/Saídas	Quantidade	Unidade
Entradas		
Algodão Orgânico		
Base de dados: Fibre, cotton, organic {RoW} fibre production, cotton, organic, ginning Cut-off, U	0.752	Kg
Saídas		
Fibra Algodão Orgânico	0.75	Kg

4.3.4.2. Reciclagem

No caso da produção das fibras recicladas, pré e pós-consumo, o inventário foi realizado considerando dados fornecidos pela empresa de reciclagem – Valérius 360°.

Independentemente da origem da matéria-prima, pré ou pós consumo, as perdas do processo são similares, considerando 15% (ficha interna da empresa baseada no histórico de produções) o que resulta num inventário igual. Os dados recolhidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Inventário do processo de produção do algodão reciclado pré e pós-consumo.

Entradas/Saídas	Quantidade	Unidade
Entradas		
Textile waste	0.295	kg
Água		
Base de dados: Water, well, PT	2.24E-05	m ³ /kg
Amaciador		
Base de dados: Non-ionic surfactant {GLO} non-ionic surfactant production, fatty acid derivate Cut-off, U	8.90E-04	Kg/kg
Eletricidade		
Base de dados: Electricity, high voltage {PT} production mix Cut-off, U	0.29	kW h/kg
Eletricidade Paineis Solares		
Base de dados: Electricity, low voltage {PT} electricity production, photovoltaic, 570kW p open ground installation, multi-Si Cut-off, U	0.05	
Saídas		
Recycled Cotton post-consumer	0.25075	Kg
Fibers Waste	0.04	Kg

4.3.4.3. Fiação

Na etapa de fiação foi produzido apenas o fio de algodão com Ne 20/1. Estimou-se um desperdício de 10% de material da fiação, com base na percentagem de desperdícios da fiação reportadas pela empresa Valérius 360°. O inventário para esta fase é apresentado na Tabela 6.

Relativamente ao transporte, o fio Ne 20/1 foi encaminhado da Valérius 360° para unidade de tricotagem, a Clothius, percorrendo 28 km, num camião de carga entre 3,5 e 7,5 toneladas.

Tabela 6 - Inventário do processo de fiação para fio Ne 20/1.

Entradas/Saídas	Quantidade	Unidade
Entradas		
Fibras de Algodão Orgânico	0.75	Kg
Fibras de Agodão reciclado pós-consumo	0.25	Kg
Fibras de Algodão reciclado pré-consumo	0.25	Kg
Eletricidade		
Base de dados: Electricity, low voltage {PT} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U	1.91	Kwh/Kg
Eletricidade Paineis Solares		
Base de dados: Electricity, low voltage {PT} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, U	0.34	Kwh/Kg
Parafina		
Base de dados: Paraffin {RER} production Cut-off, U	0.004	kg/kg
Saídas		
Fio 20/1	1.13	Kg
Resíduos de fiação	0.13	Kg

4.3.4.4. Tricotagem

O inventário foi realizado com dados recolhidos nas instalações da Clothius – Tabela 7. A tricotagem é um processo mecânico, que consome energia elétrica para o funcionamento dos teares. O consumo de eletricidade foi modelado considerando um balanço de eletricidade média tensão em Portugal.

A unidade fabril tem instalada uma central de painéis fotovoltaicos, contudo não foi possível obter valores reais de consumo, pelo facto do o sistema de monitorização ainda não estar a funcionar em pleno. Não obstante, o consumo de eletricidade foi estimado considerando valores teóricos cedidos pelo fornecedor dos painéis (Diamante Solar – Energias Renováveis, Lda.). Assumiu-se que, 31% do consumo total de eletricidade na Clothius tem origem nos painéis fotovoltaicos da empresa.

Na Clothius foi produzida a malha Jersey, sendo que a percentagem de desperdício da tricotagem, com base valores da empresa, é igual a 1,5%. Este valor foi calculado com base na diferença da quantidade necessária de fio para produzir a malha pretendida e a quantidade de malha produzida (valores recolhidos através do PROTextil, o software de gestão de produção têxtil existente e utilizado na Clothius).

De referir que, a malha desperdiçada é encaminhada para a unidade de reciclagem de resíduos têxteis, Valérius 360°.

Relativamente ao transporte, a malha Jersey foi encaminhada da Clothius para unidade de tingimento e acabamento, a ABM, percorrendo 15 km, num camião de carga entre 3,5 e 7,5 toneladas.

Tabela 7 - Inventário do processo de tricotagem.

Entradas/Saídas	Quantidade	Unidade
Entradas		
Fio 20/1	1.13	Kg
Eletricidade Rede		
Base de dados: Electricity, low voltage {PT} electricity voltage transformation from medium to low voltage Cut-off, U	0.30	Kwh/Kg
Eletricidade Paineis Solares		
Base de dados: Electricity, low voltage {PT} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, U	0.13	Kwh/Kg
Saídas		
Malha por acabar	1.11	Kg
Resíduos têxteis	0.02	

4.3.4.5. Tingimento e Acabamento

Neste processo, que decorre na ABM, principalmente na etapa de tingimento, são utilizados produtos químicos (corantes e auxiliares). No produto desenvolvido não se realizou o tingimento, considerando que se pretendia obter a cor natural do mesmo. Assim, as fases a considerar são, principalmente, a lavagem para a remoção de óleos de tear e a ramula que permite secar e estabilizar o produto desenvolvido – inventário do processo na Tabela 8.

A composição química de cada produto químico utilizado foi obtida através dos dados disponíveis nas suas fichas de dados de segurança. A modelização do inventário dos produtos químicos foi, sempre que possível, associada à composição dos mesmos.

Ao longo do processo produtivo, é necessário a utilização de uma grande quantidade de água que, posteriormente, originará um efluente. O efluente gerado passa por um processo de arejamento, que ocorre nos tanques de equalização da unidade fabril e, posteriormente, é encaminhado para a estação de tratamento de águas residuais (ETAR) municipal. Como tal, modelou-se o impacte associado ao tratamento deste efluente, considerando uma base de dados do *ecoinvent* relativa a águas residuais domésticas.

Esta unidade fabril, ABM, possui uma central fotovoltaica. Para a estimativa do consumo de eletricidade proveniente dos painéis fotovoltaicos, considerou-se que 27% do consumo de energia no tingimento e acabamento é proveniente dos painéis. Nesta etapa, também é consumido vapor gerado

pela combustão de gás natural, pelo que se contabilizou os consumos de gás natural bem como as emissões associadas.

O balanço de massa da malha processada foi realizado no final do processo de tingimento e acabamento, devido à impossibilidade de estimar as perdas de massa em cada uma das fases separadamente. Assim, estimou-se uma perda de 10% na massa da malha.

Tabela 8 - Inventário do processo de acabamento.

Entradas / Saídas	Quantidade	Unidade
Entradas		
Malha por acabar	1.11E+00	Kg
Água		
Base de dados: Water, well, PT	2.81E-02	m ³ /kg
Dyscour PAB		
Base de dados: Ethoxylated alcohol (AE11) {GLO}	2.81E-02	kg/kg
Ácido Acético		
Base de dados: acetic acid, without water, in 98% solution state {RER}	2.81E-03	kg/kg
Imolase NC 1215		
Base de dados: Chemical, organic (GLO) production	1.00E-02	kg/kg
Softine NFL		
Base de dados: Chemical, organic (GLO) production	3.00E-02	kg/kg
Gás natural		
Base de dados: Natural gas, low pressure {RoW} natural gas pressure reduction from high to low pressure Cut-off, U	8.72E-02	Kg/kg
Eletricidade		
Base de dados: Electricity, high voltage {PT} production mix Cut-off, U	5.25E-01	kWh/kg
Eletricidade Paineis Solares		
Base de dados: Electricity, low voltage {PT} electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si Cut-off, U	1.48E-01	kWh
Saídas		
Malha acabada	1.00E+00	Kg
Água residual	2.81E-02	m ³ /kg
CO	3.57E-06	Kg
NOx	3.11E-06	Kg
SO2	5.49E-08	Kg
COV	1.28E-06	Kg
Partículas	4.97E-07	Kg
CO2	2.12E-01	Kg

5. DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Análise do Ciclo de Vida de produto

O presente projeto de estudo de ACV, quantifica o impacto ambiental associado à produção de malha, com a referência/identificação RDD1389-ML e com as especificações e composição definidas na secção 3.2 deste documento – Tabela 3.

Os resultados estão apresentados considerando as fronteiras dos sistemas definidos, *UPSTREAM* e *CORE*, respetivamente:

- I. *Upstream*, inclui os processos a montante: a etapa de produção de fibras de algodão orgânico - que não se realizam nas instalações Valérius, e a produção de fibras pré e pós consumo, produzidas na Valérius 360°.
- II. *Core*, que são todos os processos produtivos realizados nas empresas Valérius – fiação, tricotagem, tingimento e acabamento.

Na Figura 18 são apresentadas as categorias de impacto ambiental com a contribuição dos processos incluídos no *UPSTREAM* e no *CORE*. Como se pode verificar, os processos *CORE* (reciclagem, fiação, tricotagem, tingimento e acabamento) possuem maiores contribuições relativas para as diferentes categorias de impacto ambiental. No caso do indicador Escassez de Água (WSP), apresenta uma contribuição de 96%.

Segundo a informação encontrada na literatura, a produção da fibra de algodão apresenta 95% do impacto total do consumo de água, sendo apenas 5% referente à etapa de processamento do produto têxtil. Para a produção de 1 kg de material têxtil são necessários 100 -150 L de água. No entanto, a quantidade de água pode variar de acordo com o tipo de estrutura têxtil, corantes e produtos químicos, processos e maquinaria utilizada no processamento do produto têxtil (Raja et al., 2019; Samanta et al., 2019). É importante referir que os valores apresentados são relativos à obtenção da fibra de algodão convencional.

Considerando que a produção da fibra de algodão orgânico é feita sem o uso de pesticidas sintéticos e fertilizantes químicos e possui muitos sistemas convencionais que utilizam água da chuva em vez de irrigação, é expectável que o impacto para a produção desta fibra seja inferior ao de obtenção da fibra convencional (Benetto et al., 2018; Esteve-Turrillas & de la Guardia, 2017).

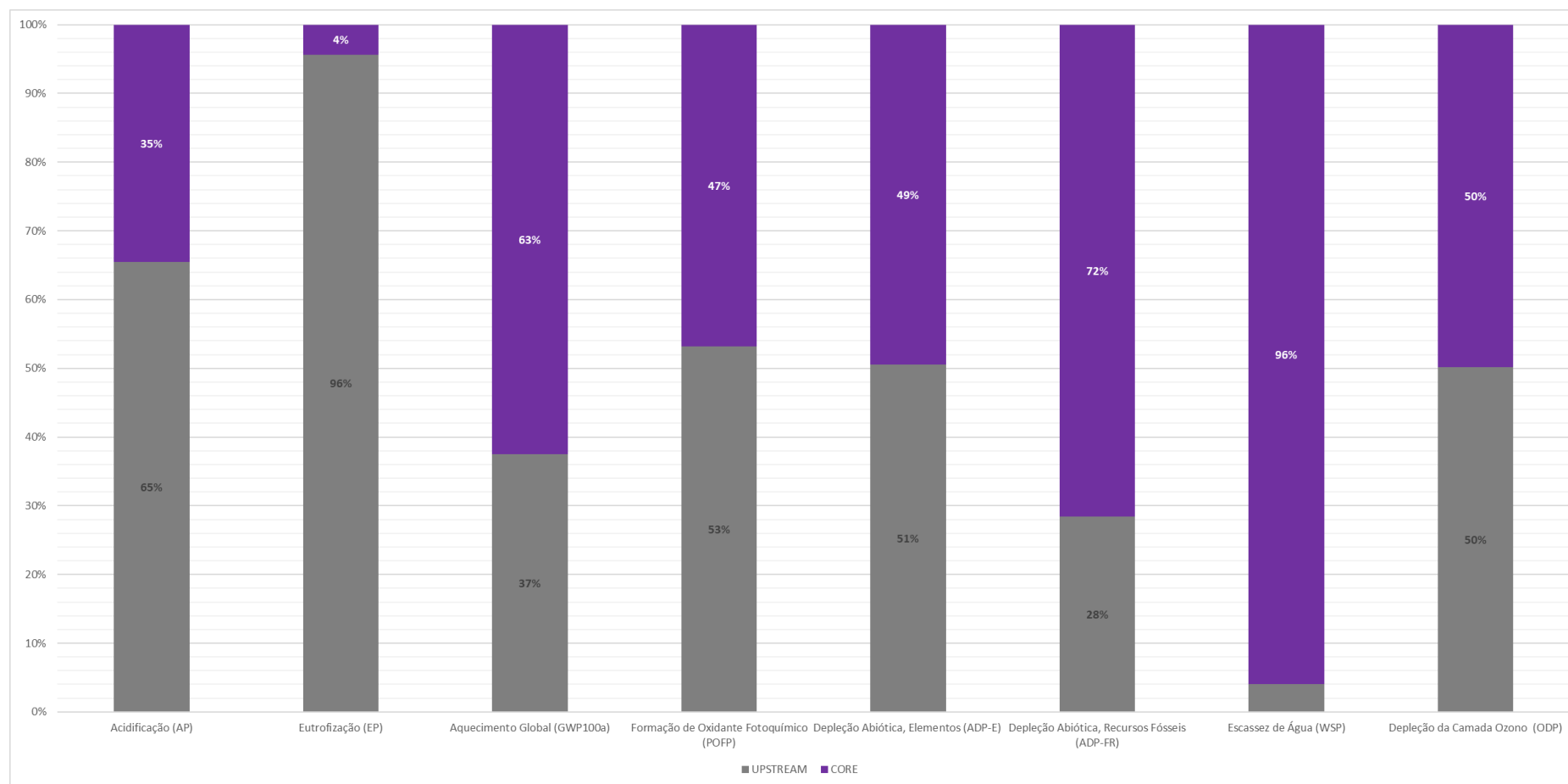


Figura 18 - Categorias de impacte ambiental com a contribuição dos processos incluídos no UPSTREAM e no CORE.

Na Figura 19 é apresentado o impacto ambiental para a produção da fibra de algodão convencional e algodão orgânico. Como podemos verificar, no caso do algodão orgânico, a categoria de impacto WSP apresenta contribuição de 16% ($9.46 \times 10^{-1} m^3 eq./ kg malha$), enquanto no caso do algodão convencional a contribuição para esta categoria de impacto ambiental é de 84% ($5.11 \times 10^1 m^3 eq./ kg malha$).

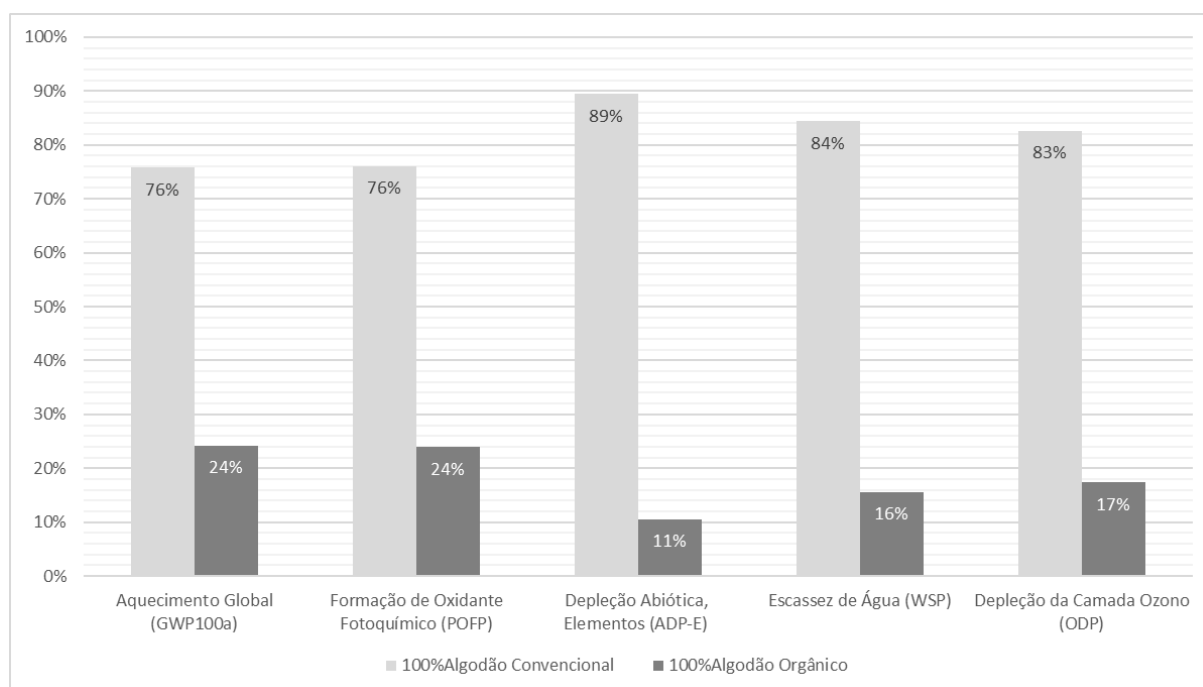


Figura 19 – Impacte por categoria ambiental para a produção da fibra de algodão convencional e algodão orgânico.

Na Figura 20 são apresentados os resultados obtidos da análise comparativa por tipo de fibra e o seu contributo relativo por categoria de impacto para o material RDD1389-ML. Analisando a figura é possível verificar que a fibra de algodão orgânico é aquela que exibe maior contribuição na categoria de impacto Escassez de Água, com um peso de 54%. Na Figura 21 é apresentada a contribuição das diferentes fases de processamento em cada categoria de impacto. Como se pode verificar, o processo com maior contribuição na categoria de impacto WSP, é o processo de Acabamento, com peso de 63%.

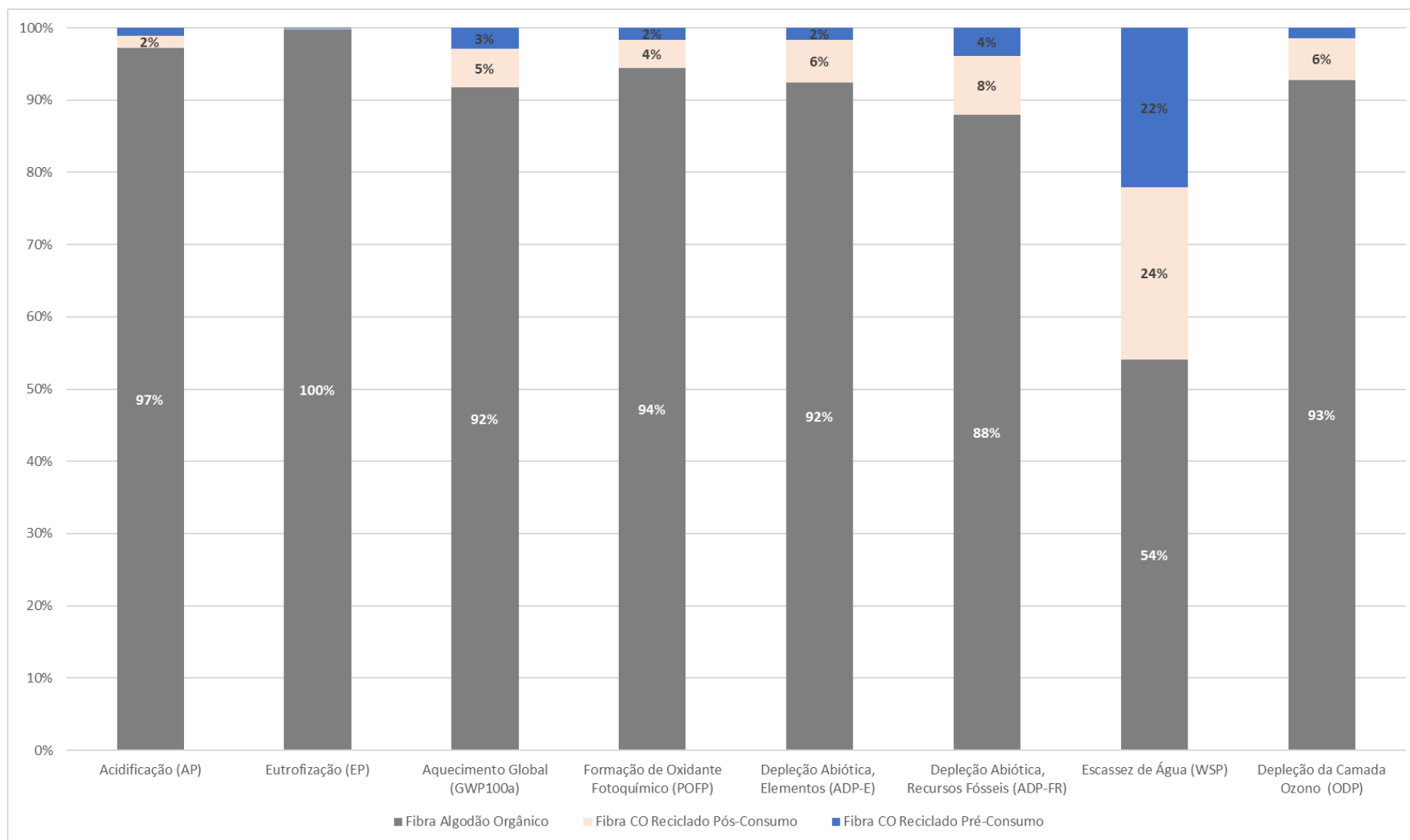


Figura 20 - Contribuição da produção de fibra em cada categoria de impacto.

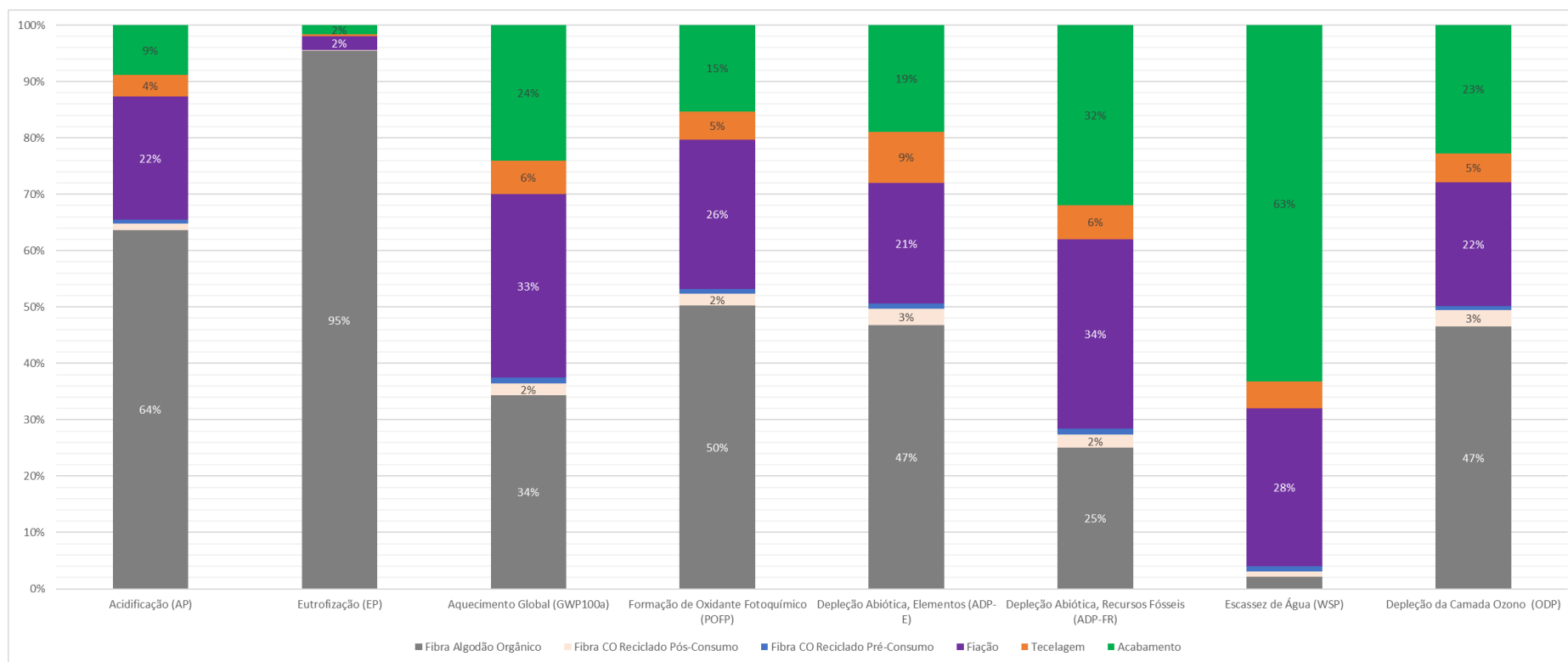


Figura 21 - Contribuição das diferentes fases de processamento em cada categoria de impacto.

Os processos incluídos no *CORE* apresentam ainda uma contribuição de 72%, para indicador Depleção Abiótica, Recursos Fósseis (ADP-FR), seguido de uma contribuição de 63% para o indicador Aquecimento Global (GWP 100a). Para estes indicadores estamos a considerar a utilização de recursos fósseis e a emissão de Gases de Efeito de Estufa (GEE). Ao analisar a Figura 21 é possível destacar 2 processos que contribuem de forma significativa para o indicador de impacto ADP-FR – a Fiação e o Acabamento, com peso de 34% e 32%, respetivamente. Estes resultados estão sobretudo associados ao consumo de combustíveis fósseis para a produção de energia – gás natural, e eletricidade. Como se pode verificar pelos dados da Figura 22, (dados EDP primeiro trimestre 2023), parte de energia produzida advém de fontes não renováveis – 73.4%. No caso do indicador Aquecimento Global, maiores consumos de energia, levam ao aumento das emissões atmosféricas.

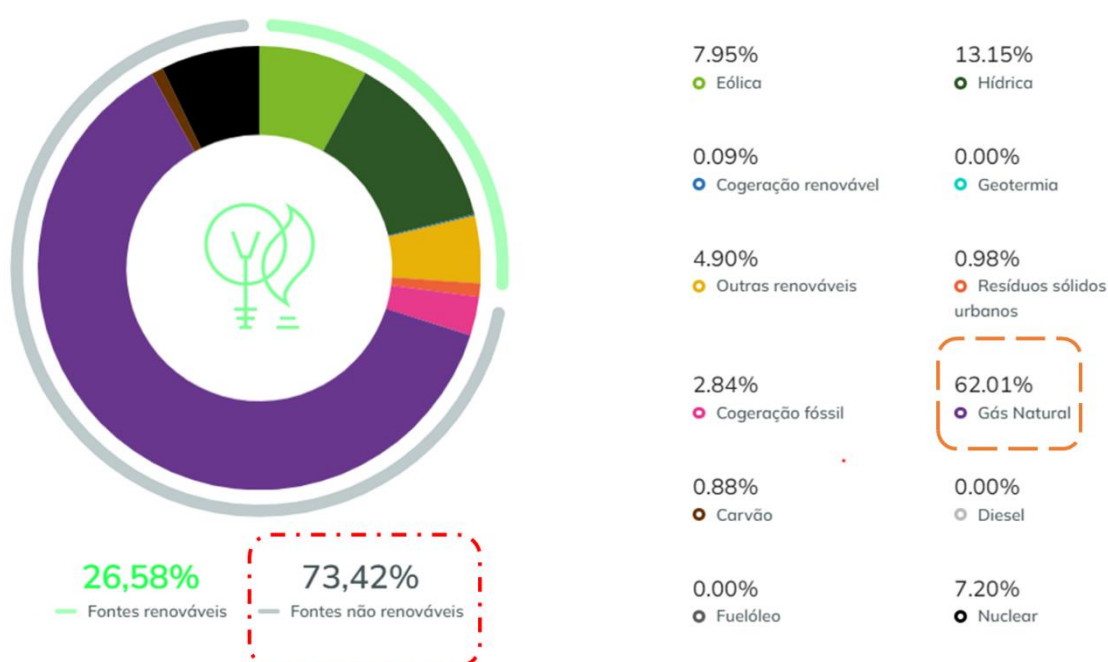


Figura 22 - Origem da energia rede EDP.

Adaptado de: <https://www.edp.pt/origem-energia/?sector=17026&year=2023&trimester=2>

O indicador com menor contribuição para os processos incluídos no *CORE* é a Eutrofização (EP), que reflete os efeitos de nitrificação, resultantes da adição de nutrientes ao solo – 4%. As elevadas quantidades de energia necessárias para os processos incluídos no *CORE*, contribuem consideravelmente para a emissão de CO₂ e, por sua vez, para a categoria de impacto Acidificação (AP), neste caso, 35%.

Os processos incluídos no *UPSTREAM* (a produção de fibra), apresentam maior contribuição nas categorias de impacto ambiental de Eutrofização, que reflete o excesso de nutrientes de massa de água,

como nitratos, fosfatos e sulfatos, presentes principalmente nos fertilizantes, os quais são aplicados nas plantações de algodão e que podem atingir os lençóis freáticos contaminando a água.

No sentido de avaliar em detalhe qual o processo produtivo que possui uma maior contribuição, procedeu-se então à análise das categorias de impacto ambientais para cada processo produtivo, avaliados individualmente - Figura 21.

A produção de fibra de algodão orgânico é o processo responsável pelos impactos superiores nas categorias de acidificação e eutrofização, pelo uso de fertilizantes e pesticidas e, principalmente, pela área necessária para cultivar esta matéria prima.

Na categoria da escassez da água (WSP), o processo produtivo que apresenta maior contributo é o processo de acabamento, com um peso de 63%. Não obstante, e para o produto em estudo, seria expectável para esta categoria, o processo de produção da fibra também apresentar um valor significativo considerando a água necessária para a produção desta matéria-prima - para produzir 1kg de algodão são necessários 10 000 L (10 m³) de água. Na produção de algodão orgânico este consumo baixa cerca de 91%, ou seja, para produzir 1 kg de algodão orgânico são necessários 0.9 m³ (900 L) de água. No entanto, apesar de a quantidade de água utilizada no processo de Acabamento ser inferior, 2.81×10^{-2} m³ de água por kg de malha, este processo envolve ainda o uso de grandes quantidades de energia e diversos produtos químicos tendo por isso uma contribuição significativa na maioria dos indicadores de impacto ambiental (Esteve-Turrillas & de la Guardia, 2017).

A nível da escassez dos recursos fósseis ((ADP-FR)), considerando o elevado consumo energético para as fases de fiação e acabamento, possuímos uma contribuição de 34% e 32%, respetivamente, para este indicador de impacto ambiental. Apesar de a unidade fabril apresentar uma central fotovoltaica com uma eficiência de 34% no caso da fiação (Valérius 360°) e 27% no caso da ABM (acabamento), estes consumos continuam a ser significativos, estando associados à energia consumida por parte das várias máquinas utilizadas. Na Figura 22 podemos ainda constatar que parte da energia utilizada - energia rede – é produzida a partir de fontes de energia não renovável (73.4%) contribuindo assim para os valores obtidos do indicador em análise.

A categoria Aquecimento Global (GWP100a) apresenta como processo de maior contributo a produção fibra de algodão orgânico a e fiação com impacto de 34% e 33%, respetivamente. No caso da fiação, deve-se essencialmente ao impacto associado ao consumo de energia elétrica, e no caso da produção da fibra de algodão, o resultado obtido está relacionado principalmente, com a utilização e manutenção de grandes extensões territoriais para sua obtenção. Na Figura 23 podemos ver o impacto de cada processo de forma individual para a categoria de impacto GW e ODP.

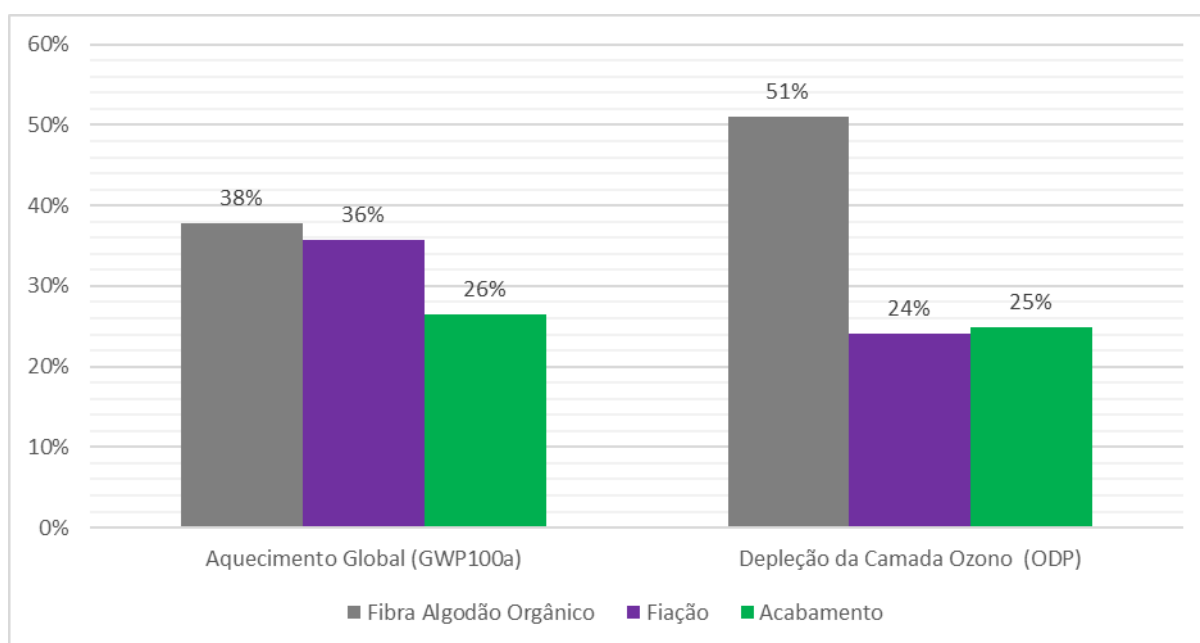


Figura 23 - Contribuição do processo de produção da fibra de algodão orgânico, fiação do fio usado para o produto RDD1389-ML e acabamento do produto RDD1389-ML nas categorias de impacte GWP e ODP.

A produção da fibra de algodão orgânico possui ainda a maior contribuição para a categoria de impacte depleção da camada de ozono (ODP) - 51%.

Para este indicador, o processo de acabamento não possui uma contribuição elevada dado que, não foi considerado o processo de tingimento para o processamento do material RDD1389-ML. Assim, este processo não envolve o uso de corantes, possui assim consumos de água e químicos inferiores, quando comparado com processo de tingimento convencional.

Na Figura 24 são apresentados os resultados para a comparação do processo sem tingimento (desencolagem - usado na produção/acabamento do produto RDD1389-ML) e com tingimento.

No processo do material em que ocorre o tingimento são utilizados corantes e produtos químicos necessário para a coloração da malha acabada, sendo ainda necessárias etapas adicionais de lavagem, fazendo com que o consumo de água seja superior.

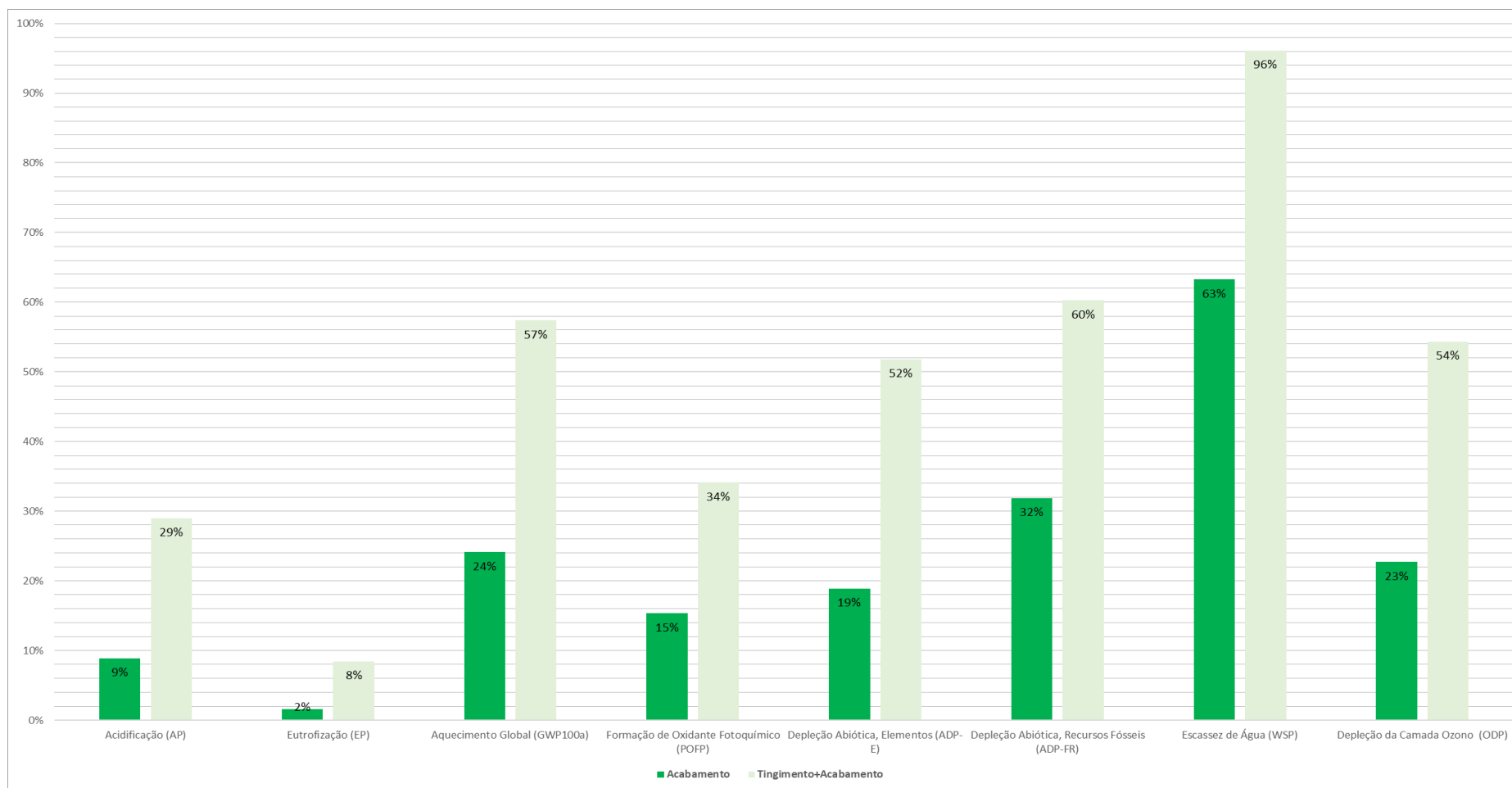


Figura 24 - Contribuição das diferentes fases de processamento para processo com e sem tingimento em cada categoria de impacto.

Na Tabela 9 é apresentado o inventário para o processo de tingimento. Comparando os dados deste inventário com os dados do processo utilizado para a obtenção da malha RDD1389-ML verificamos que a quantidade de água necessária utilizada varia de $2.81 \times 10^{-2} \text{m}^3$ de água por kg de malha no caso do processo sem tingimento para 5.18 m^3 de água por kg de malha no caso do processo com tingimento, aumentando assim o consumo de água cerca de 14 vezes.

Tabela 9- Inventário para o processo de tingimento.

Entradas / Saídas	Quantidade	Unidade
ENTRADAS		
Malha por acabar	1.11	Kg
Água		
Base de dados: Water, well, PT	5.18	m^3/kg
Base de dados: Ethoxylated alcohol (AE11) {GLO}	4.28×10^{-1}	kg/kg
Base de dados: acetic acid, without water, in 98% solution state {RER}	4.28×10^{-1}	kg/kg
Base de dados: Salicylic acid {GLO} salicylic acid production Cut-off, U	4.0×10^{-1}	kg/kg
Base de dados: Chemical, organic (GLO) production	3.95	kg/kg
Base de dados: Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} chlor-alkali electrolysis, membrane cell Cut-off, U	8.0×10^{-1}	kg/kg
Base de dados: Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} hydrogen peroxide production, product in 50% solution state Cut-off, U	4.0×10^{-1}	kg/kg
Base de dados: Enzymes {RER} enzymes production Cut-off, U	2.0×10^{-1}	kg/kg
Base de dados: Sodium chloride, powder {RER} production Cut-off, U	8	kg/kg
Base de dados: Acrylic acid {RER} production Cut-off, U	2.4×10^{-1}	kg/kg
Gás natural		
Base de dados: Natural gas, low pressure {RoW} natural gas pressure reduction from high to low pressure Cut-off, U	11.3	Kg/kg
Eletricidade		
Base de dados: Electricity, high voltage {PT} production mix Cut-off, U	11.4	kW h/kg
Eletricidade Paineis Solares		
Base de dados: Electricity, low voltage {PT} electricity production, photovoltaic, 570kW p open ground installation, multi-Si Cut-off, U	4.15	kW h
SAÍDAS		
Malha acabada	1.00	Kg
Água residual	5.18	m^3/kg
CO	7.19×10^{-4}	Kg
NOx	3.62×10^{-3}	Kg
SO ₂	1	Kg
COV	1.39×10^{-5}	Kg
Partículas	2.49×10^{-4}	Kg
CO ₂	54.3	Kg

Na Figura 25 é apresentada a contribuição das diferentes fases de processamento em cada categoria de impacto, considerando o processo de tingimento. Considerando a adição do processo de tingimento é possível verificar que existem vários indicadores de impacto ambiental que adquirem maior relevância.

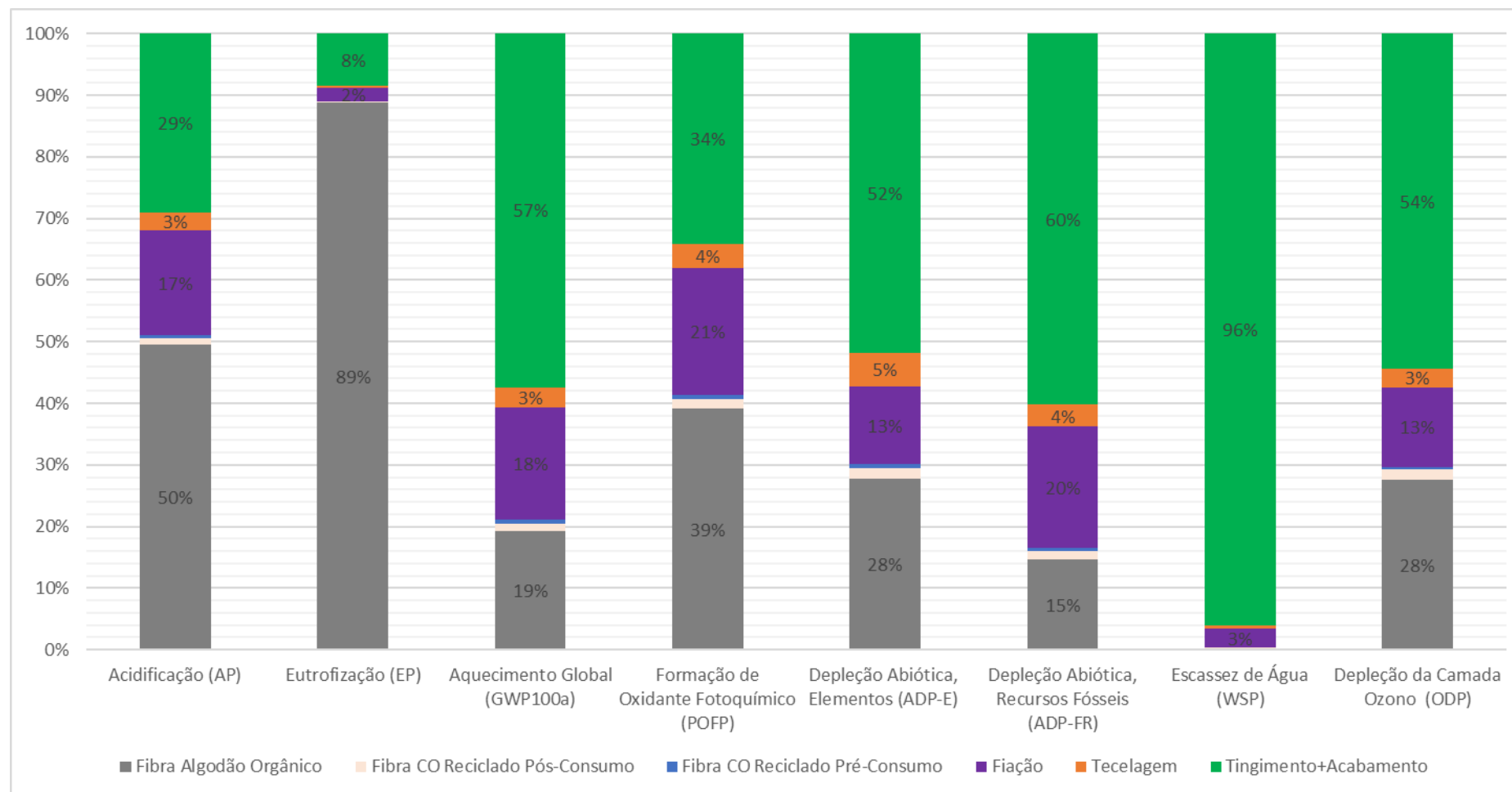


Figura 25 - Contribuição das diferentes fases de processamento (considerando tingimento) em cada categoria de impacto.

Nas Figuras 26, 27 e 28 são apresentados os resultados comparativos para a categoria de impacto Aquecimento Global, Depleção Abiótica e Escassez de Água considerando a realização do processo de tingimento.

Comparando os dois processos, com e sem tingimento, verificamos o aumento de $6.41 \times 10^{-1} \text{ kg CO}_2 \text{ eq.}$ para $2.72 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.}$ para a categoria de impacto aquecimento global - Figura 26.

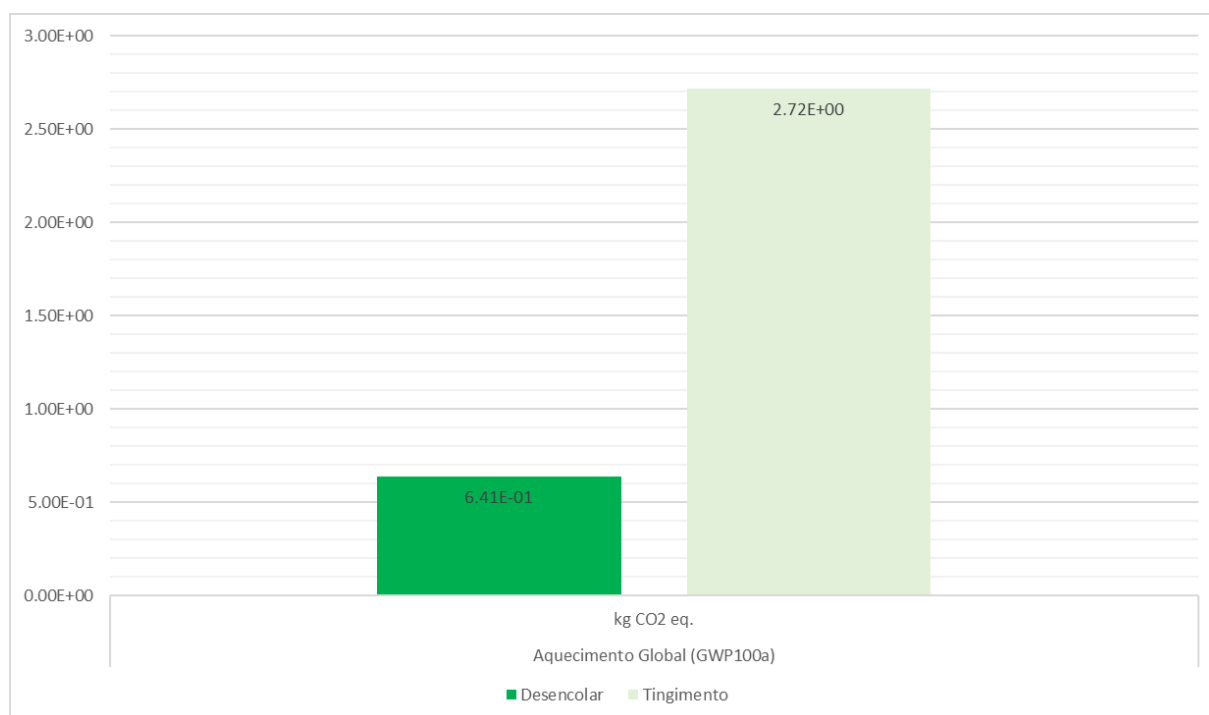


Figura 26 - Contribuição do processo de tingimento para a categoria de impacto GWP.

O indicador de impacto ambiental GWP considera os gases de efeito de estufa, sendo os resultados do indicador kg equivalentes de CO₂ por unidade funcional. No caso do processamento da malha sem tingimento temos a emissão de $2.12 \times 10^{-1} \text{ kg CO}_2 \text{ eq./kg}$ – Tabela 8 da Secção 3.3, no caso do processamento da malha com tingimento temos $54.3 \text{ kg CO}_2 \text{ eq./kg}$ – Tabela 9. Com a emissão de CO₂ nas quantidades mencionadas é expectável o indicador GWP ser superior quando consideramos o processo de tingimento.

Na Figura 27 é possível observar as diferenças obtidas para as categorias de impacto ADP-E e ADP-FR, respetivamente. A nível da escassez dos recursos fósseis (ADP-FR), o valor do consumo energético considerando o processo de tingimento é superior, neste caso, $3.15 \times 10^1 \text{ MJ/kg}$ em vez de 9.73 MJ/kg .

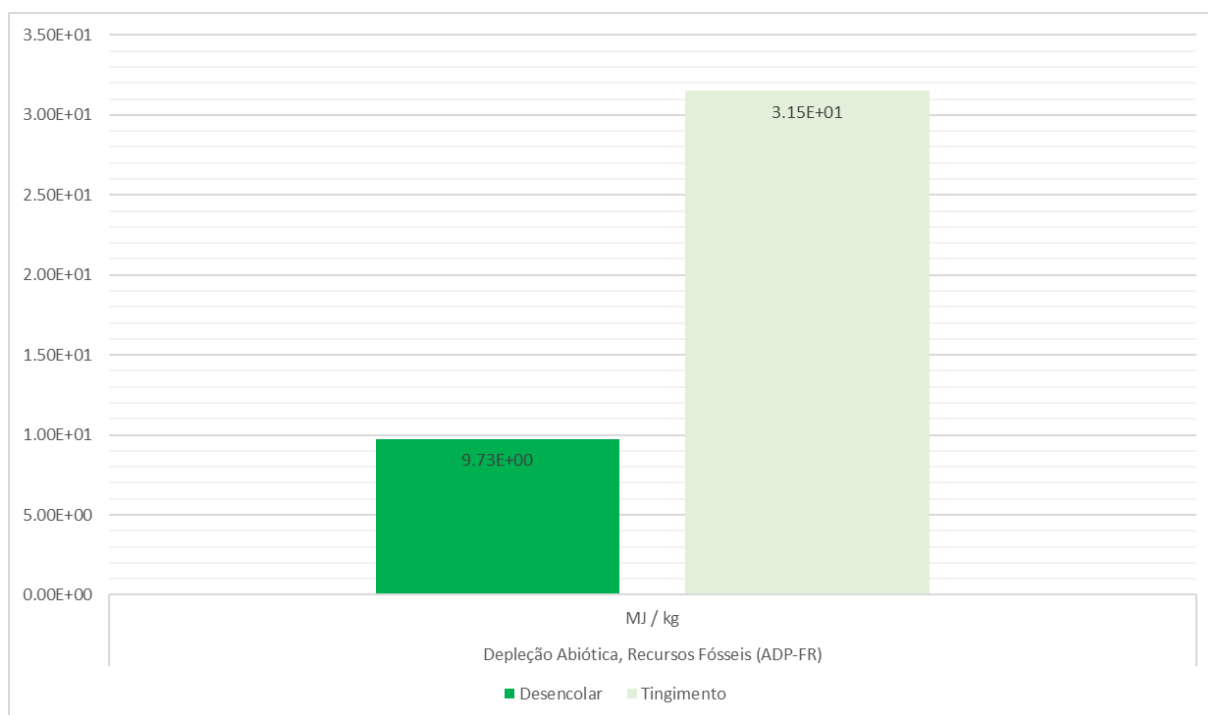


Figura 27 – Consumo de energia para o processamento de malha com e sem processo de tingimento em MJ/kg malha.

Relativamente ao consumo de água necessário ao processo, como seria expectável, existe maior necessidade deste recurso para o processamento da malha com tingimento - $1.55 \times 10^1 m^3$ em vez de $1.07 m^3$ – Figura 28.

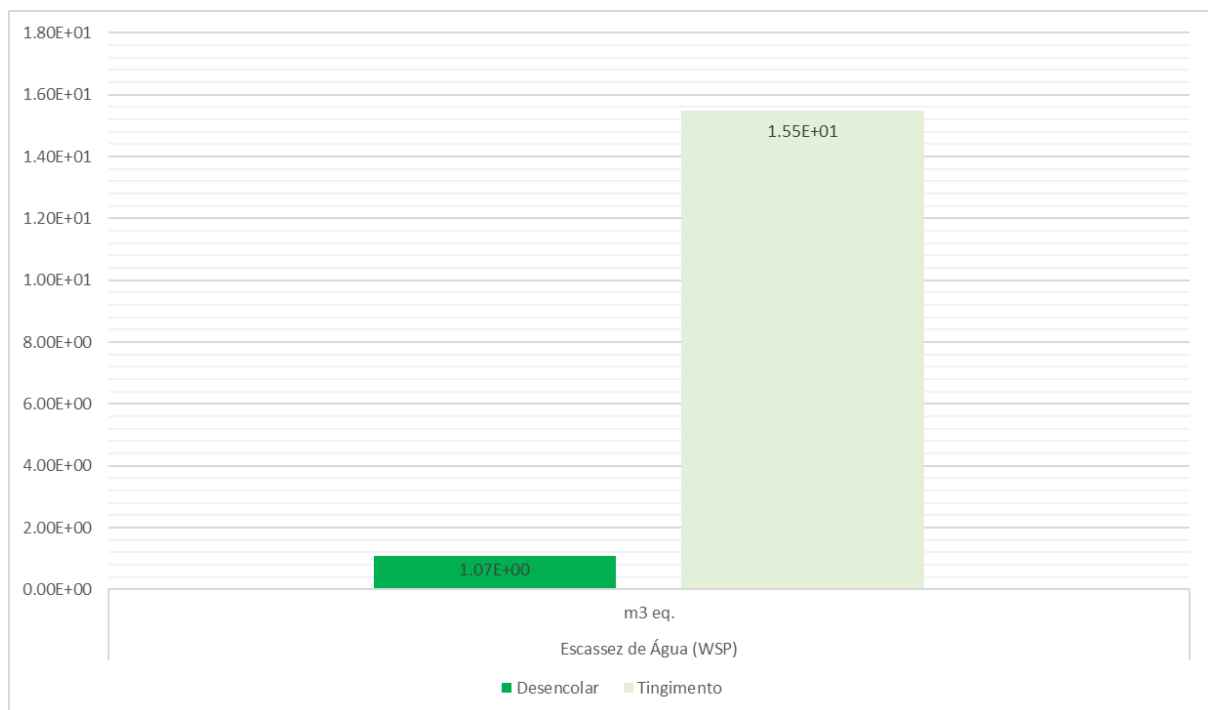


Figura 28 - Consumo de água para o processamento de malha com e sem processo de tingimento em m³.

Na Tabela 10, estão apresentados, por categoria de impacto ambiental, as poupanças (*savings*) da utilização do processo acabamento em alternativa ao processo de tingimento e acabamento.

Tabela 10 - Poupanças (*savings*) da utilização do processo de acabamento sem tingimento em alternativa ao processo com tingimento.

Categoria de impacto	Unidade	Poupança
Acidificação (AP)	kg SO ₂ eq.	76%
Eutrofização (EP)	kg SO ₄ ³⁻ eq.	82%
Aquecimento Global (GWP100a)	kg CO ₂ eq	76%
Formação de Oxidante Fotoquímico (POFP)	kg NMVOC	65%
Depleção Abiótica, Elementos (ADP-E)	kg Sb eq.	78%
Depleção Abiótica, Recursos Fósseis (ADP-FR)	MJ	69%
Escassez de Água (WSP)	m ³ H ₂ O eq.	93%
Depleção da Camada Ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	75%

Dos resultados e análises realizados é possível verificar que o processo de tingimento contribui de forma significativa (>75%) para os indicadores de impacto ambiental Acidificação, Eutrofização, Aquecimento Global, Depleção Abiótica, Elementos e Escassez de água.

Relativamente à matéria-prima utilizada, fibra de algodão orgânico virgem, fibra de algodão reciclado pré-consumo e fibra de algodão pós-consumo, existem diferenças para as categorias de impacto que devemos considerar.

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados para cada categoria de impacto ambiental considerando a tipologia/origem da fibra quando comparados com a mistura utilizada para a obtenção do produto RDD1389-ML (60%fibra de algodão orgânico virgem, 20%fibra de algodão reciclado pré-consumo e 20%fibra de algodão pós-consumo).

Tabela 11 - Resultados para cada categoria de impacto ambiental considerando a origem da fibra quando comparados com a mistura utilizada para a obtenção do produto RDD1389-ML.

Categoria de impacto	100%CO Conv.	100% CO Org.	60%CO Org. / 40% CO Conv.	50% CO Org / 50% CO Rec.360 (pré-consumo)
Acidificação (AP)	65%	31%	34%	-7%
Eutrofização (EP)	-21%	41%	17%	-11%
Aquecimento Global (GW P100a)	74%	20%	40%	-2%
Formação de Oxidante Fotoquímico (POFP)	77%	26%	44%	-4%
Depleção Abiótica, Elementos (ADP-E)	92%	29%	70%	3%
Depleção Abiótica, Recursos Fósseis (ADP-FR)	75%	15%	40%	-1%
Escassez de Água (WSP)	97%	82%	90%	82%
Depleção da Camada Ozono (ODP)	84%	25%	54%	-4%

Como se pode verificar a mistura considerada para o desenvolvimento do produto em estudo possui melhorias significativas quando comparada com 100%algodão convencional, 100%algodão orgânico e mistura de 60%algodão orgânico com 40%algodão convencional.

Para a categoria de impacto ambiental Eutrofização, verifica-se que o algodão convencional possui melhor desempenho quando comparado com a utilização de algodão orgânico. Este resultado pode ser considerado, numa primeira análise anômalo, no entanto, é explicado pela base de cálculo utilizada. Isto significa que, uma vez que a base de cálculo é 1 kg de material, o baixo rendimento que se verifica no cultivo do algodão orgânico justifica a diferença de valores. Os verdadeiros benefícios do algodão orgânico são constatados quando se utiliza uma base de cálculo relativo ao terreno de cultivo, por exemplo, hectare de cultivo, devido à menor quantidade utilizada – para a mesma área de cultivo a quantidade de fibra de algodão convencional obtida é superior à do algodão orgânico (Avadí et al., 2020)).

Na Figura 29 estão apresentados os resultados comparativos para a categoria de impacto Acidificação, Eutrofização e Aquecimento Global considerando diferentes origens para a fibra de algodão. Como se pode verificar o produto RDD1389-ML é, no geral, aquele que apresenta uma menor contribuição para as categorias de impacto em análise. Para a categoria de impacto Eutrofização, o algodão convencional apresenta uma menor contribuição justificada pelo rendimento associado ao cultivo de algodão (Avadí et al., 2020; Brooke Roberts-Islam, 2023).

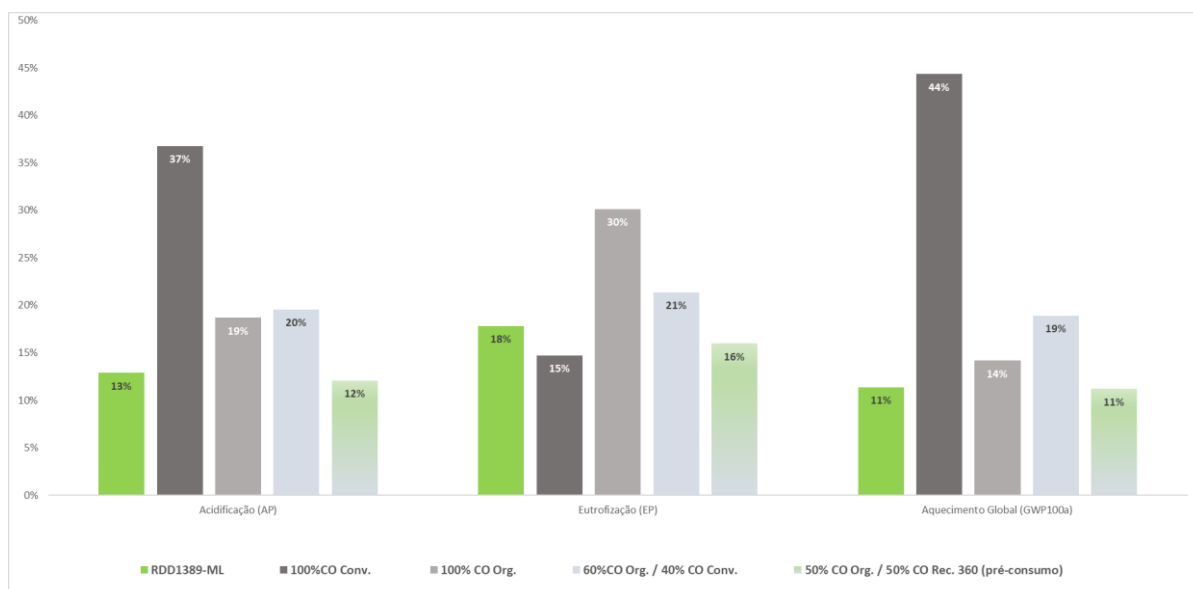


Figura 29 - Resultados comparativos para a categoria de impacte Acidificação, Eutrofização e Aquecimento Global considerando diferentes origens para a fibra de algodão.

É ainda possível verificar que a mistura de algodão utilizada no produto RDD1389-ML e a mistura de algodão orgânico com algodão reciclado pré-consumo, possuem contribuições similares para as categorias de impacte ambiental apresentadas. A diferença está na percentagem de algodão orgânico utilizado, 60% algodão orgânico no caso do produto RDD1389-ML e no outro caso 50% algodão orgânico e, a percentagem e origem da fibra reciclada utilizada. Para o produto RDD1389-ML utilizamos 20% algodão reciclado pré consumo e no outro caso, 50% de algodão reciclado pré-consumo. A principal diferença, reside nos 20% algodão reciclado pós-consumo utilizado no produto RDD1389-ML.

As contribuições relativas à utilização de diferentes origens de algodão para o desenvolvimento de produtos similares, não são significativas como pudemos verificar ao longo deste subcapítulo.

Considerando a análise da Figura 20, contribuição da produção de fibra em cada categoria de impacte, verificamos que a composição/matéria-prima para o produto RDD1389-ML tem maior impacte nas categorias de Acidificação (AP), Eutrofização (EP), Aquecimento Global (GWP100a), Depleção Abiótica, Elementos (ADP-E) e Depleção da Camada Ozono (ODP).

Assim, na Figura 30 é apresentada a contribuição de cada produto para cada categoria de impacte relacionado com a matéria-prima.

A categoria de impacte que mais se destaca, como esperado, é a Eutrofização. Este resultado está relacionado, principalmente, área/solo necessária para cultivo e produção da fibra.

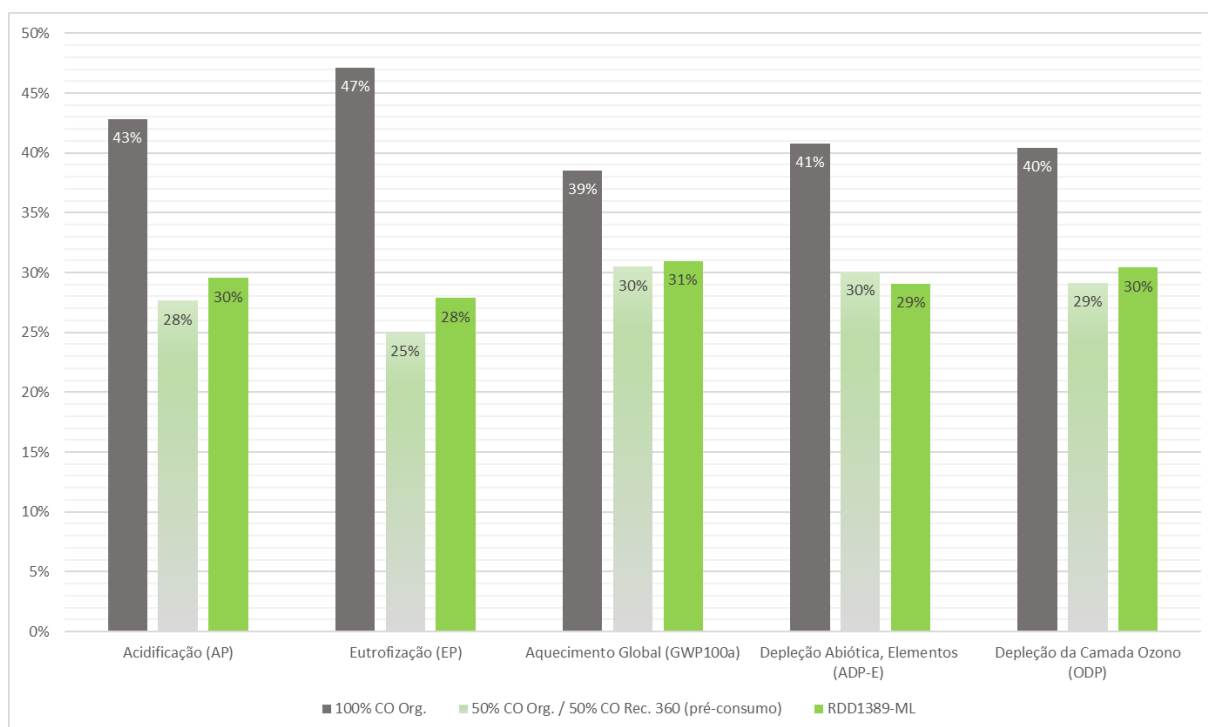


Figura 30 - Contribuição de cada produto para cada categoria de impacte relacionado com a matéria-prima.

É ainda possível verificar que o produto com componente reciclada possui uma menor contribuição para todas as categorias de impacte ambiental.

Assim, retirando o indicador EP, dado que o mesmo está essencialmente associado ao cultivo do algodão, e considerando apenas a comparação entre o produto RDD1389-ML e produto 50%CO Org / 50%CO Rec. 360 (pré-consumo), obtém-se os resultados apresentados na Figura 31.

Incorporar fibra reciclada no produto têxtil apresenta vantagens no que se refere a algumas categorias de impacte ambiental como se pôde verificar, no entanto, quando tentamos perceber ao detalhe as vantagens da valorização de resíduos, através da reciclagem de materiais e incorporação dos mesmos na cadeia de valor têxtil a ferramenta atual para a medição do impacto desta reutilização é insuficiente.

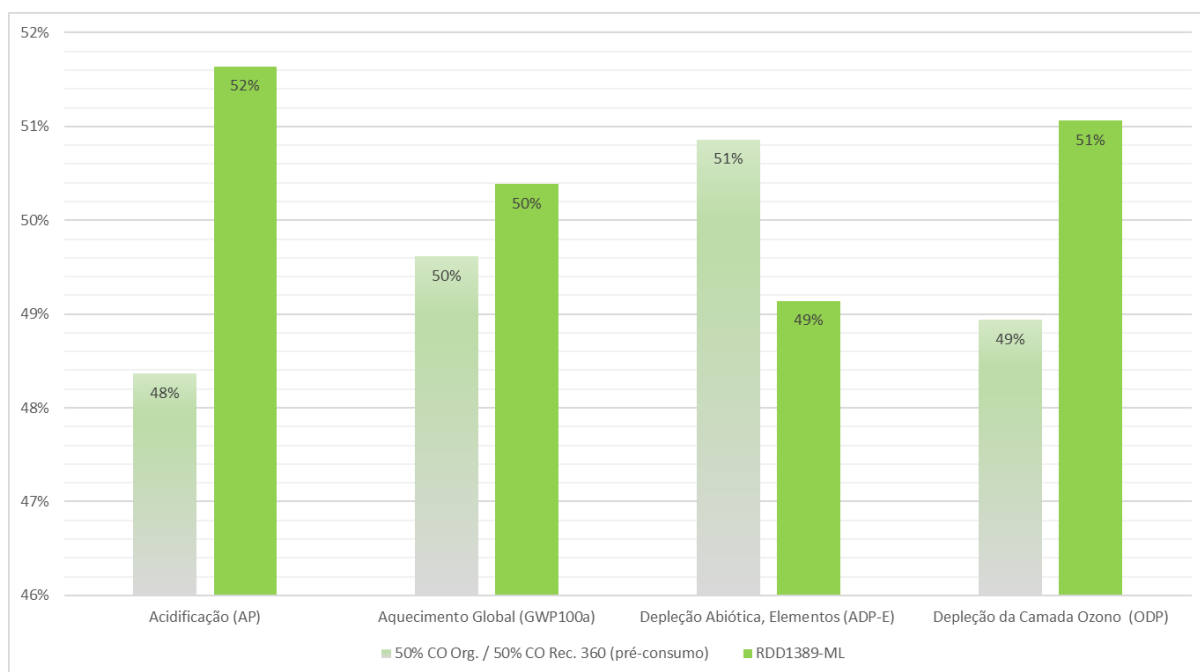


Figura 31 - Contribuição do produto RDD1389-ML e 50%CO Org/50%CO REC. 360 (pré-consumo) para cada categoria de impacte relacionado com a matéria-prima.

Na Figura 31 estão apresentadas as contribuições de 2 produtos em que parte da matéria-prima utilizada é reciclada. No caso do produto RDD1389-ML temos também a utilização de algodão reciclado pós-consumo como matéria-prima. Comparando os 2 produtos, a nível de categorias de impacte ambiental o produto RDD1389-ML não apresenta nenhuma melhoria, pelo contrário, apresenta uma contribuição superior para os indicadores AP e ODP, o que pode ser justificado pela utilização de uma maior percentagem da fibra de algodão orgânico, 60% no caso da malha RDD1389-ML em vez de 50% para a malha jersey 50%algodão orgânico e 50%algodão reciclado pré-consumo.

5.2. Propriedades Físicas

Para a malha desenvolvida, RDD1389.ML foram realizados testes de controlo de qualidade de produto para validação da viabilidade do mesmo. Estes resultados foram posteriormente comparados com os resultados obtidos para as malhas de jersey 100% algodão, jersey 100% algodão orgânico e jersey 50% algodão orgânico e 50% algodão reciclado pré-consumo.

Os testes a considerar para esta análise são o controlo da massa por unidade de área, a espiralidade, a estabilidade dimensional, a resistência ao rebentamento e o *pillingbox*.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados obtidos para os testes (propriedades físicas) realizados a cada uma das malhas.

Propriedades Físicas	Malhas Jersey Analisadas			
	100%CO	100%CO ORG	50%CO ORG / 50%CO REC	60%CO ORG / 20%CO REC PRE-CONS. / 20%CO REC. PÓS. CONS. RDD1389-ML
Massa por unidade de área [g/m²] EN 12127:1997	220	220	215	215
Espiralidade [%] ISO 16322-2:2021	1	1.9	2.1	1.9
Estabilidade dimensional [%] ISO 5077:2007 / ISO 6330:2021	- 6.5 / 6	-6 / -5.5	-7 / -6	-4 / -6.5
Resistência ao rebentamento[kPa] ISO 13938-2:2019	558	552	415	496
Pilling Box ISO 12945-1:2020	4/5	4/5	4	4

A diferença existente para o valor da massa por unidade de área obtido não é significativa. Isto é, considerando que todas as malhas em análise possuem o mesmo título de fio, Ne 20/1, foram tricotadas no mesmo tear e foram processadas da mesma forma, não era expectável que este parâmetro fosse muito diferente.

Quando analisamos a estabilidade dimensional e a espiralidade, verificamos uma maior variação. No entanto, não apresenta uma variação acentuada que indique uma pior prestação.

Relativamente aos resultados obtidos para a resistência ao rebentamento e *pillingBox*, as malhas com algodão reciclado na sua estrutura, apresentam valores mais baixos, incluindo a malha desenvolvida RDD1389-ML. Existem já alguns estudos em que se verifica que as propriedades do fio melhoram quando a proporção de fibra de algodão virgem no fio aumenta (Lu et al., 2023; Utebay et al., 2023). Estes resultados estão relacionados com a tipologia de fibra e tecnologia de fição utilizada para a produção do fio utilizado na estrutura de cada uma das malhas.

Por norma, o comprimento de uma fibra de algodão médio é 28mm. No caso das fibras recicladas mecanicamente o comprimento de fibra varia entre 10 e 25mm. Valores inferiores de comprimento de fibra são, geralmente, associados a piores resultados no que se refere a resultados da resistência à rotura e *pillingbox*. O comprimento da fibra impacta a irregularidade do fio (Candan et al., 2000) .

A tecnologia de fição utilizada na produção dos fios possui impacto no seu desempenho. A tecnologia de fição utilizada nas malhas jersey com algodão virgem é diferente para da tecnologia de fição utilizado nas malhas jersey com algodão reciclado mecanicamente. No caso das malhas jersey com algodão virgem é tecnologia *ring spun*, enquanto nas malhas jersey com algodão reciclado a tecnologia é *open-end*.

Na tecnologia *ring spun* (Fiação Anel) as fibras são torcidas através de um anel giratório. Na tecnologia *open-end* (Fiação Rotor) a produção dos fios é realizada pelo entrelaçamento das fibras no interior de uma turbina chamada rotor. Enquanto produto final, materiais desenvolvidos com fio *open-end* possuem um toque mais seco, áspero e maior probabilidade de formar borboto (Candan et al., 2000; Erdumlu et al., 2009; Soe et al., 2004).

Assim, os resultados obtidos para a resistência ao rebentamento e *pillingbox*, quando comparados com os obtidos para as malhas com algodão virgem na sua estrutura mostram a viabilidade do produto desenvolvido.

6. CONCLUSÃO

A produção mundial de têxteis quase duplicou entre 2000 e 2015 (Ellen MacArthur Foundation, 2017). Estes dados alarmantes destacam a urgência de ações concretas para promover uma indústria têxtil mais sustentável e responsável.

Existem diversos obstáculos a superar para reduzir significativamente os resíduos têxteis. Um estudo da *McKinsey* revela que a indústria tem como objetivo reciclar 2,5 milhões de toneladas de resíduos têxteis até 2030 (McKinsey Apparel, 2022). No entanto, a União Europeia não estabeleceu metas específicas para o conteúdo reciclado em vestuário, mas pretende que, até 2030, a maioria dos produtos têxteis vendidos na região seja feita de fibras recicladas, além de serem duráveis, reparáveis e recicláveis (Diário da República, 2023).

Atualmente, menos de 1% do vestuário é reciclado, e os processos de reciclagem ainda estão em desenvolvimento (European Environment Agency, 2022; Fashion for Good et al., 2020; McKinsey Apparel, 2022). De acordo com dados das Nações Unidas, a UE exportou 1,4 milhões de toneladas de têxteis usados em 2022, mais do que o dobro de 2000 (COMISSÃO EUROPEIA, 2022a). No entanto, nem todo esse vestuário é reutilizado, sendo exportado, por exemplo, da Europa para África onde, quando o mesmo não é revendido, acaba em lixeiras.

A indústria têxtil desempenha um papel significativo na geração de resíduos, sendo responsável por 5% do total de resíduos no mundo (Stanescu, 2021). Assim, torna-se imperativo a utilização de metodologias de análise para avaliar e melhorar o desempenho ambiental dos produtos.

Como estudado ao longo desta dissertação, a ACV ajuda a estabelecer a avaliação quantitativa do impacto ambiental, bem como a identificar maneiras de melhorar o desempenho ambiental dos produtos ao longo de seu ciclo de vida. Indicadores-chave de desempenho (KPI) precisam de ser definidos para cada etapa de produção (consumo de materiais e energia, resíduos emergentes, etc.) com o intuito de identificar os elementos que contribuem para o impacto ambiental.

Desta análise podemos assumir que os requisitos usados para a medição de algumas das categorias de impacto ambiental não são as mais adequadas.

A unidade funcional utilizada para a normalização não é eficiente para que a análise de resultados seja crítica e transparente – exemplo algodão convencional *versus* algodão orgânico. Fazendo a normalização por kg fibra o algodão orgânico irá sempre apresentar maior contribuição para algumas categorias de impacto ambiental dado que para produzir a mesma quantidade de fibra, quando comparado com o algodão convencional, precisa de maior área. Ao ser necessário maior área para cultivo da mesma quantidade, temos, por exemplo, maior consumo de água.

No caso das emissões de CO₂ (GWP), existe uma maior contribuição para a obtenção da fibra reciclada a partir de resíduos têxteis pós-consumo, $5.34 \times 10^{-2} \text{ kg CO}_2 \text{ eq./kg}$, quando comparado com a obtenção da fibra reciclada a partir de resíduos têxteis pré-consumo, $2.91 \times 10^{-2} \text{ kg CO}_2 \text{ eq./kg}$. O mesmo se verifica para o consumo de água, $1.50 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ eq./kg}$, para o caso da fibra reciclada obtida a partir de resíduos pré-consumo e $1.62 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ eq./kg}$ para a fibra obtida a partir de resíduos pós-consumo. Considerando que as entradas e saídas são exatamente iguais, esta diferença poderá estar associada às considerações realizadas para a percentagem de perdas – iguais nas duas situações (15%). Considerando que este foi um dos primeiros produtos/ malha desenvolvidos com fibra reciclada a partir de resíduos pós-consumo, não foi possível determinar a percentagem de perdas exata associada a este processo em específico. Outra possibilidade é o tempo de processo, e por sua vez, consumo de energia associado. Não existe informação relativamente ao tempo necessário para a reciclagem de resíduos pré-consumo e a obtenção da respetiva fibra quando comparado com a reciclagem de resíduos pós-consumo e a obtenção da fibra.

A matéria-prima utilizada, fibra obtida a partir da reciclagem mecânica de resíduos têxteis, foi utilizada como substituta de fibra virgem para a produção do fio Ne 20/1. Neste contexto, não existe qualquer tipo de “vantagem” associado à reutilização de um material em fim de vida: 20% - desperdícios de corte de confeção (resíduos pré-consumo); 20% - vestuário que, em vez de ir para aterro ou inceneração, foi reutilizado para produção de fibra. Isto é, não existe nenhuma contribuição para os impactos evitados decorrentes da produção do produto virgem – produção 1kg de algodão necessita de 10 000 L de água - e, para o impacto evitado do aterro – por ano cerca de 92 milhões de toneladas de têxteis (vestuário) acaba em aterros. Esta é uma lacuna que encontramos relativamente aos dados de reciclagem (inventário do ciclo de vida).

Este é um tópico que carece de mais investigação almejando a definição de requisitos específicos quando se trata de matérias diferentes do comumente analisados na indústria têxtil. Como resultado, poderemos ter análises de impacto mais rigorosas que, efetivamente, reflitam o impacto desde a produção de matéria-prima ao produto final.

No que se refere às propriedades físicas obtidas para a malha desenvolvida – RDD1389-ML, foi possível verificar que quando comparamos esta malha com os seus similares, não existem diferenças significativas. Ao contrário do que seria expectável, e como verificado pelos testes de resistência ao rebentamento e teste de *pillingBox*, fios desenvolvidos com fibras curtas, utilizando a tecnologia de fiação *open-end* para o desenvolvimento do fio, não diminuem o desempenho da malha desenvolvida. De

salientar que o produto desenvolvido para este estudo possui, além das fibras curtas de pré-consumo fibras curtas de pós-consumo.

Para uma melhor caracterização do produto desenvolvido seria necessário estudar com maior detalhe as propriedades dos materiais pós consumo entregues para reciclar:

- Processamento têxtil utilizado no material original
- Ciclos de utilização
- média do comprimento de fibra resultante da reciclagem pós-consumo

Os resultados obtidos nesta dissertação são muito promissores, para aquele que será um caminho longo da indústria têxtil, almejando uma utilização efetiva da reciclagem como processo chave para a diminuição do impacto ambiental do setor.

7. REFERÊNCIAS

- Ahmed, N. S. E., Nassar, S. H., & El-Shishtawy, R. M. (2020). Novel green coloration of cotton fabric. Part I: Bio-mordanting and dyeing characteristics of cotton fabrics with madder, alkanet, rhubarb and curcumin natural dyes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 63(5), 1605–1617.
- AirDye. (n.d.). *AirDye*. AIRDYE® WATERLESS PRINTING AND DYEING. Retrieved June 3, 2023, from <https://debscorp.com/textiles/airdye/>
- Ananas Anam. (2017). *Ananas Anam: the pioneers of innovative natural textiles from waste pineapple leaves*. The Manufacturing Process of Piñatex. <https://www.ananas-anam.com/about-us/>
- Avadi, A., Marcin, M., Biard, Y., Renou, A., Gourlot, J. P., & Basset-Mens, C. (2020). Life cycle assessment of organic and conventional non-Bt cotton products from Mali. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 678–697.
- Benetto, E., Gericke, K., & Guiton, M. (2018). *Life cycle assessment of organic, BCI and conventional cotton: a comparative study of cotton cultivation practices in India*. Springer International Publishing.
- Brooke Roberts-Islam. (2023, May 9). *When It Comes To Sustainable Cotton, Fashion's Focused On 1% at the Expense Of The Other 99. Why?* Forbes.
- Brydges, T. (2021). Closing the loop on take, make, waste: Investigating circular economy practices in the Swedish fashion industry. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126245.
- Business of Fashion, & McKinsey & Company. (2023). *The State of Fashion 2023*.
- Candan, C., Nergis, U. B., & Iridağ, Y. (2000). Performance of Open-End and Ring Spun Yarns in Weft Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*, 70(2), 177–181.
- Che, J., & Yang, X. (2022). A recent (2009–2021) perspective on sustainable color and textile coloration using natural plant resources. In *Helijon* (Vol. 8, Issue 10). Elsevier Ltd.
- Chen, X., Memon, H. A., Wang, Y., Marriam, I., & Tebyetekerwa, M. (2021). Circular Economy and Sustainability of the Clothing and Textile Industry. *Materials Circular Economy*, 3(1), 12.

Cluster Têxtil. (2017). *Cluster Têxtil: Tecnologia e Moda*. Cluster Têxtil: Tecnologia e Moda.

Com, B. W. B., Khawar Balwan, W., Singh, A., Kour, S., & Kashmir, I. (2022). European Journal of Biotechnology and 5R's of zero waste management to save our green planet: A narrative review. *European Journal of Biotechnology and Bioscience*.

Comissão Europeia. (2019). *Communication and roadmap on the European Green Deal*.

Comissão Europeia. (2020). *Um novo Plano de Ação para a Economia Circular Para uma Europa mais limpa e competitiva*.

Comissão Europeia. (2022a). *Estratégia da UE em prol da Sustentabilidade e Circularidade dos Têxteis*.

Comissão Europeia. (2022b). *Novas propostas para tornar os produtos sustentáveis a norma*.

Comissão Europeia. (2023). *Revisão do quadro de acompanhamento da UE para a economia circular*.

Coscieme, L., Manshoven, S., Gillabel, J., Grossi, F., & Mortensen, L. F. (2022). A framework of circular business models for fashion and textiles: the role of business-model, technical, and social innovation. *Sustainability: Science, Practice, and Policy*, 18(1), 451–462.

CTI Tool - WBCSD. (2023). *Take the driver's seat in your company's circular transition*. CTI Tool.

Daglis, T., Tsironis, G., & Tsagarakis, K. P. (2023). Data mining techniques for the investigation of the circular economy and sustainability relationship. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200151.

Dahmani, N., Benhida, K., Belhadi, A., Kamble, S., Elfezazi, S., & Jauhar, S. K. (2021). Smart circular product design strategies towards eco-effective production systems: A lean eco-design industry 4.0 framework. *Journal of Cleaner Production*, 320.

Diário da República. (2023). *Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos 2030*.

Dissanayake, D. G. K., & Weerasinghe, D. (2022). Towards Circular Economy in Fashion: Review of Strategies, Barriers and Enablers. *Circular Economy and Sustainability*, 2(1), 25–45.

Elia, V., Gnoni, M. G., & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741–2751.

Ellen MacArthur Foundation. (n.d.). *Introduction to circular design practices*. Ellen MacArthur Foundation: We Need to Radically Rethink How We Design. Retrieved June 15, 2023, from <https://ellenmacarthurfoundation.org/introduction-to-circular-design/we-need-to-radically-rethink-how-we-design>

Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*.

Ellen MacArthur Foundation. (2021). *How the circular economy tackles biodiversity loss*.

Erdumlu, N., Ozipek, B., Oztuna, A. S., & Cetinkaya, S. (2009). Investigation of Vortex Spun Yarn Properties in Comparison with Conventional Ring and Open-end Rotor Spun Yarns. *Textile Research Journal*, 79(7), 585–595.

Esha Chhabra. (2023, August 15). *The Challenge Facing Fashion's Latest Sustainability Buzzword*. Business of Fashion.

Esteve-Turrillas, F. A., & de la Guardia, M. (2017). Environmental impact of Recover cotton in textile industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 107–115.

European Commission. (2021). *Guidance on Waste Definitions - European Commission*.

European Environment Agency. (2022, February 10). *Textiles and the environment: the role of design in Europe's circular economy*. European Environment Agency.

European Environment Agency. (2023). Como tornar o consumo e a produção de têxteis mais sustentáveis? *European Environment Agency*.

Evrrnu. (n.d.). *NuCycl@:How the process works*. Evrrnu.

Fashion for Good. (2023). *Textile Processing – How disruptive innovation can pave the way to a sustainable fashion supply chain / Part I*.

Fashion for Good, Rory Hugill, Katrin Ley, & Kathleen Rademan. (2020). *Coming Full Circle: Innovating Towards Sustainable Man-Made Cellulosic Fibres*.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.

Gomes, M., & Soares, G. (2023). A Review of Bacterial Pigments: Harnessing Nature's Colors for Functional Materials and Dyeing Processes. *Textile & Leather Review*, 6, 167–190.

Goñi, M. L., Gañán, N. A., & Martini, R. E. (2021). Supercritical CO₂-assisted dyeing and functionalization of polymeric materials: A review of recent advances (2015–2020). *Journal of CO₂ Utilization*, 54, 101760.

Henry B. (2023, April 12). *Circular design: Product design and business model strategies for the circular economy*. Design for Circularity.

Ibrahim, N. A., Eid, B. M., & Kafafy, H. (2020). Sustainable colorants for protective textiles. In *Advances in Functional and Protective Textiles* (pp. 569–629). Elsevier.

Islam, Md. T., Jahan, R., Jahan, M., Howlader, Md. S., Islam, R., Islam, Md. M., Hossen, Md. S., Kumar, A., & Robin, A. H. (2022). Sustainable Textile Industry: An Overview. *Non-Metallic Material Science*, 4(2).

Jia, F., Yin, S., Chen, L., & Chen, X. (2020). The circular economy in the textile and apparel industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120728.

Juanga-Labayen, J. P., Labayen, I. V., & Yuan, Q. (2022). A Review on Textile Recycling Practices and Challenges. *Textiles*, 2(1), 174–188.

Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative Agriculture—A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 3). MDPI.

- Koszevska, M. (2018). Circular Economy — Challenges for the Textile and Clothing Industry. *Autex Research Journal*, 18(4), 337–347.
- Lara, L., Cabral, I., & Cunha, J. (2022). Ecological Approaches to Textile Dyeing: A Review. *Sustainability*, 14(14), 8353.
- Lu, L., Fan, W., Meng, X., Xue, L., Ge, S., Wang, C., Foong, S. Y., Tan, C. S. Y., Sonne, C., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Lam, S. S. (2023). Current recycling strategies and high-value utilization of waste cotton. *Science of The Total Environment*, 856, 158798.
- Manickam, P., & Duraisamy, G. (2019). 3Rs and circular economy. In *Circular Economy in Textiles and Apparel* (pp. 77–93). Elsevier.
- McKinsey Apparel, F. & L. G. (2022). *Scaling textile recycling in Europe-turning waste into value*.
- Nayak, R., Nguyen, L. V. T., Panwar, T., & Jajpura, L. (2020). Sustainable technologies and processes adapted by fashion brands. In *Sustainable Technologies for Fashion and Textiles* (pp. 233–248). Elsevier.
- Newton, P., Civita, N., Frankel-Goldwater, L., Bartel, K., & Johns, C. (2020). What Is Regenerative Agriculture? A Review of Scholar and Practitioner Definitions Based on Processes and Outcomes. In *Frontiers in Sustainable Food Systems* (Vol. 4). Frontiers Media S.A.
- Ospital, P., Masson, D. H., Beler, C., & Legardeur, J. (2022). *A DIGITAL PRODUCT PASSPORT TO SUPPORT PRODUCT TRANSPARENCY AND CIRCULARITY*.
- Parlamento Europeu. (2023). *A-9-2023-0176_PT*.
- Qiu, E., & Vitone, T. (2023). Corporate Sustainability in the Fashion Industry. *Journal of Student Research*, 12(1).
- Raja, A. S. M., Arputharaj, A., Saxena, S., & Patil, P. G. (2019). Water requirement and sustainability of textile processing industries. *Water in Textiles and Fashion: Consumption, Footprint, and Life Cycle Assessment*, 155–173.

Redress Design Award. (2023). *CIRCULAR DESIGN STRATEGIES*. Incorporating Circular Design Strategies - Design For Low Waste | Design For Low-Impact Materials And Processes | Design For Longevity | Design For Recyclability.

Renewcell. (n.d.). *CIRCULOSE®*. Renewcell. Retrieved September 28, 2023, from

Samanta, K. K., Pandit, P., Samanta, P., & Basak, S. (2019). Water consumption in textile processing and sustainable approaches for its conservation. *Water in Textiles and Fashion: Consumption, Footprint, and Life Cycle Assessment*, 41–59.

Sayem, A. S. M. (2022). Digital fashion innovations for the real world and metaverse. In *International Journal of Fashion Design, Technology and Education* (Vol. 15, Issue 2, pp. 139–141). Taylor and Francis Ltd.

Soe, A. K., Takahashi, M., Nakajima, M., Matsuo, T., & Matsumoto, T. (2004). Structure and Properties of MVS Yarns in Comparison with Ring Yarns and Open-End Rotor Spun Yarns. *Textile Research Journal*, 74(9), 819–826.

Spinnova. (n.d.). *The Innovative Textile Fibre*. Spinnova. Retrieved September 1, 2023, from <https://spinnova.com/>

Spreafico, C. (2022). An analysis of design strategies for circular economy through life cycle assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3).

Stanescu, M. D. (2021). State of the art of post-consumer textile waste upcycling to reach the zero waste milestone. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14253–14270.

Taieb, A. H., & Amor, M. Ben. (2023). Eco-design Design Strategy: Case Study Biomimicry Approach in Design Product Materials. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 21(3), 1–20.

Textile Exchange. (2022). *Material Change Insights 2021: The state of fiber and materials sourcing*.

Textile Exchange. (2023). *Material Change Insights 2022*.

Utebay, B., Celik, P., & Cay, A. (2023a). Valorization of fabric wastes through production of recycled cotton yarns by compact ring and open-end rotor spinning. *Journal of Cleaner Production*, 409, 137135.

Utebay, B., Celik, P., & Cay, A. (2023b). Valorization of fabric wastes through production of recycled cotton yarns by compact ring and open-end rotor spinning. *Journal of Cleaner Production*, 409, 137135.

Wang, Y. (2010). Fiber and Textile Waste Utilization. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 135–143.

Whicher, A., Harris, C., Beverley, K., & Swiatek, P. (2018). Design for circular economy: Developing an action plan for Scotland. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3237–3248.

WRAP. (2017). *Sustainable Clothing*. <https://wrap.org.uk/resources/guide/sustainable-clothing-guide>

Zille, A. (2020). Plasma technology in fashion and textiles. In *Sustainable Technologies for Fashion and Textiles* (pp. 117–142). Elsevier.