



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

***Potencial eco-sustentável de um compósito reforçado com  
fibras naturais aplicado a um equipamento multifuncional  
para suporte e estabilização de câmaras***

**Gabriel Sobral Cordeiro**

Leiria, Fevereiro de 2016



Dissertação

Mestrado em Engenharia da Conceção e Desenvolvimento de Produto

***Potencial eco-sustentável de um compósito reforçado com  
fibras naturais aplicado a um equipamento multifuncional  
para suporte e estabilização de câmaras***

**Gabriel Sobral Cordeiro**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação da Doutora Irene Sofia Carvalho Ferreira, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação da Doutora Cristina Maria Nogueira Romão, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viseu.

Leiria, Fevereiro de 2016



*"Toda a ciência começa como filosofia e termina em arte".*  
Will Durant

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Agradecimentos

---

Agradeço à estimada Professora Doutora Irene Carvalho Ferreira, minha orientadora, por todo o contributo e pela grande disponibilidade que sempre demonstrou. E igualmente à Professora Doutora Cristina Nogueira Romão, coorientadora, por toda sabedoria transmitida e todo o apoio prestado.

Agradeço ao Professor Doutor José Luís Soares Esteves por todo o apoio cedido e pela grande disponibilidade e simpatia demonstrada e por conseguinte ao Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), em particular à unidade de materiais compósitos.

Um agradecimento especial ao Professor Doutor Nelson Simões Oliveira pelo importante e prestável apoio e orientação na concretização da Avaliação do Ciclo de Vida e pela disponibilidade demonstrada desde o início do projeto.

Ao Carlos Dias pela grande disponibilidade e pelo importante suporte prestado no fabrico dos componentes, ensaios técnicos, e pelos bons momentos de conversa. E ao Marco Santos pelo suporte técnico na realização da recolha de dados para caracterização dos consumos energéticos.

À minha família pela constante e compreensível distração para com os meus deveres. À Yan Shu por todo o apoio, incentivo e amizade demonstrada. Ao Luís Simões, por todo o suporte prestado e igualmente a todos os meus amigos e todas as pessoas que de forma direta ou indireta, contribuíram para o presente projeto.

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

O desenvolvimento e subsistência das sociedades está estreitamente relacionado com os recursos existentes e a sua acessibilidade. As crescentes preocupações ambientais, assim como a criação de leis ambientais mais exigentes, têm vindo a impulsionar a investigação e desenvolvimento de materiais provenientes de matérias-primas renováveis abundantes e economicamente viáveis, que exijam processos de transformação mais simples, com boas performances, capazes de substituir alguns materiais sintéticos comuns e, que permitam reduzir os impactos ambientais. É neste âmbito que se encontram alguns materiais compósitos reforçados com fibras naturais e onde a resposta a estes requisitos pode ser encontrada.

Além da redução dos impactos ambientais, a produção de fibras naturais e de compósitos derivados, podem contribuir para o desenvolvimento desta indústria em áreas rurais com forte tradição agroflorestal, nomeadamente ao nível da criação de emprego, e consequentemente na melhoria do desenvolvimento económico e social dos meios rurais, promovendo assim um desenvolvimento sustentável. De facto, as fibras naturais apresentam bastantes vantagens face às fibras sintéticas, em particular em aplicações não estruturais ou semiestruturais, onde o elevado desempenho não é um requisito, e como tal podem substituir as fibras de vidro nessas aplicações. Contudo, a aplicação de fibras naturais em materiais compósitos, não os torna automaticamente num material com melhores características ambientais. Nesse contexto, é fundamental realizar estudos cuidados com suporte científico, sendo que um dos métodos que permite suportar tal análise é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ferramenta que é utilizada neste estudo [1-4].

O presente projeto visa avaliar os potenciais impactos ambientais associados ao fabrico de um suporte multifuncional de câmara produzido com um biocompósito de matriz polimérica de ácido poliláctico reforçado com fibras naturais de linho. Para tal, será efetuado um estudo comparativo, tendo por base sempre o mesmo produto, mas produzido com polipropileno reforçado com fibras de vidro, com o fim de identificar as vantagens e desvantagens em termos ambientais, associadas à aplicação do biocompósito de matriz polimérica de ácido poliláctico em componentes de produtos similares ao caso de estudo. Este estudo, ACV, assume como hipótese de base que a matéria-prima e o produto são maioritariamente produzidos e fabricados em Portugal continental. Com o fim de garantir uma maior coerência e objetividade ao longo de todo o estudo, a metodologia adotada visou o desenvolvimento do produto acima referido, assim como o fabrico de alguns dos seus componentes e a caracterização mecânica do material biocompósito utilizado.

Pretende-se, deste modo, entender em que medida a aplicação de um biocompósito em produtos sem requisitos de elevado desempenho ao nível de propriedades mecânicas, poderá representar uma melhoria no desempenho ambiental, comparativamente a um outro material compósito comum. Para tal, a análise e validação dos resultados será efetuada através de uma avaliação comparativa do ciclo de vida do produto.

***Palavras-Chave:*** *Avaliação do Ciclo de Vida, Biocompósitos, Desenvolvimento Sustentável, Ecodesign, Fibras naturais de Linho, Ácido Poliláctico.*

The development and subsistence of societies is closely related to the existing resources and its accessibility. Growing environmental concerns as well as the creation of more strict environmental laws have been driving the research and development of materials from abundant renewable raw materials and economically viable, which require simple transformation processes, with good performances and capable to replace some common synthetic materials and reduce environmental impacts. In this context, some composites reinforced with natural fibers appears to accomplish these requirements.

In addition to the reduction of the environmental impacts, the production of natural fibers and composite may contribute to the development of this industry in rural areas with strong agroforestry tradition, and therefore to the creation of employment, which can represent an improvement in the economic and social development of these rural areas into promoting a sustainable development. In fact, natural fibers provide many benefits when compared to synthetic fibers, in particularly regarding non-structural or semi-structural applications where high performance is not required, and consequently they can replace glass fibers in some of these applications. However, the use of natural fibers in composite materials does not automatically make them a material with improved environmental characteristics. To determine that, it is essential to carry out carefully analysis based on scientific methods. One of these methods is the life cycle assessment, which is used in this study [1-4].

The present project aims to evaluate the potential environmental impacts associated with the manufacture of a multifunctional camera support, produced with a biocomposite polymeric matrix of flax fibers reinforced polylactic acid, by comparison with the same product produced with glass fibers reinforced polypropylene. The objective is to understand the advantages and disadvantages of biocomposite polymeric matrix of flax fibers reinforced polylactic acid, regarding the environment aspects, when they are used in components of similar products of the one that is study. For that, it is assuming that the raw material and the product are mostly produced and manufactured in mainland Portugal. In order to ensure a better coherence and objectivity throughout the study, the methodology that was adopted focus in the aforesaid product developing, as well as in the manufacture of some of its components and the mechanical characterization of the biocomposite material applied.

The aim is to understand to what extent the application of a biocomposite, used in products with lower mechanical performance requirements, can represent an improvement in environmental performance, when compared to another common composite material. For that purpose, the analysis and validation of results would be carry out through a comparative life cycle assessment of the product.

**Keywords:** *Life Cycle Assessment, Biocomposites, Sustainable Development, EcoDesign, Flax Fibres, Polylactic Acid.*

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tabelas.....	xv
Nomenclaturas, Siglas e Abreviaturas.....	xvii

<b>1 Introdução.....</b>	<b>01</b>
1.1. Enquadramento teórico.....	01
1.2. Motivação e objetivos.....	03
1.3. Organização da estrutura da dissertação.....	04
<b>2 Revisão da Literatura.....</b>	<b>05</b>
2.1. Sustentabilidade e ambiente.....	05
2.1.1 Desenvolvimento sustentável: evolução do conceito e das políticas.....	05
2.1.2. Implicação dos biocompósitos no desenvolvimento sustentável.....	13
2.1.3. Ecodesign e a otimização do ciclo de vida de produtos.....	16
2.1.4. Técnicas de gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida.....	19
2.1.5. Metodologia da avaliação do ciclo de vida.....	22
2.2. Compósitos em geral e biocompósitos.....	27
2.2.1. Matrizes poliméricas, biopolímeros e o PLA.....	29
2.2.2. Reforços de fibras artificiais, fibras sintéticas e fibras naturais de origem vegetal.....	33
2.2.3. Fibras de linho.....	38
2.2.4. Aplicações.....	42
2.2.5. Processos de fabrico.....	44
2.2.6. Reciclagem e biodegradabilidade.....	45

<b>3 Desenvolvimento do produto</b> .....	<b>49</b>
3.1. Contexto, objetivos e metodologia adotada .....	50
3.2. Modelação e especificações do produto.....	50
3.3. Tecido híbrido de linho / PLA .....	52
3.4. Processo de fabrico .....	53
<b>4 Estudo de caracterização mecânica</b> .....	<b>57</b>
4.1. Ensaio de caracterização mecânica.....	57
4.1.1. Ensaio de flexão em três pontos .....	58
4.1.2. Ensaio de tração .....	60
4.1.3. Observações sobre os resultados obtidos .....	62
4.2. Análise comparativa.....	65
<b>5 Avaliação do ciclo de vida</b> .....	<b>67</b>
5.1. Definição dos objetivos e âmbito .....	67
5.2. Inventário .....	69
5.2.1. Definição das fronteiras do sistema.....	70
5.2.2. Recolha de informação e análise da sua qualidade .....	71
5.2.3. Processamento dos dados (inventário) .....	71
5.3. Análise dos resultados e avaliação dos impactos ambientais.....	76
5.4. Conclusões .....	85
<b>6 Conclusões</b> .....	<b>87</b>
6.1. Conclusões sobre o trabalho realizado .....	87
6.2. Recomendações para trabalhos futuros .....	90
<b>Bibliografia</b> .....	<b>91</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>97</b>

# Índice de Figuras

---

Figura 2.1: Sustentabilidade e suas dimensões .....	12
Figura 2.2: Representação esquemática do ciclo de vida dos materiais (adaptado de [21]) .....	13
Figura 2.3: Estrutura da avaliação do ciclo de vida (adaptado de [27]) .....	22
Figura 2.4: Formação de PET, através da combinação entre o Etilenoglicol e Ácido tereftálico [21] ..	30
Figura 2.5: Estrutura do PLA [37] .....	32
Figura 2.6: Classificação das fibras naturais (adaptado de [6]).....	35
Figura 2.7: Representação da secção transversal da haste linho (Adaptado de [43]).....	39
Figura 2.8: Imagem microscópica da extremidade de uma haste de linho macerado [44] .....	39
Figura 2.9: Colheita do linho por arrancamento [47] .....	40
Figura 2.10: Maceração por orvalho [47] .....	40
Figura 2.11: Assedagem de fibras de linho em contexto industrial [47] .....	41
Figura 2.12: Feixe de filamentos de linho processado e homogeneizado [48].....	41
Figura 2.13: Soalho extrudido em compósito [54].....	43
Figura 2.14: Mercedes Classe S, possui 27 componentes fabricados em materiais naturais renováveis [51] .....	43
Figura 2.15: Scooter com cobertura externa e outros componentes produzidos em biocompósito [52] ..	44
Figura 2.16: Guitarra produzida com compósito reforçado com fibras de linho e resina epóxida biobaseada [53] .....	44
Figura 2.17: Cobertura de fachada produzida num compósito de bioresina reforçado com fibras de cânhamo [55].....	44
Figura 2.18: Pormenor do fabrico dos painéis [55].....	44
Figura 2.19: Representação esquemática de um aparelho de moldagem por compressão (adaptado de [21]) .....	45
Figura 2.20: Códigos para identificação de plásticos para reciclagem [36].....	46
Figura 2.21: Alguns polímeros e a sua biodegradabilidade (adaptado de [61]) .....	48
Figura 3.1: Modelação do produto desenvolvido: A) Aspeto do produto fechado; B) Modo de suporte ao peito; C) Modo de suporte ao peito com suporte para acessórios; D) Modo de suporte ao ombro com suporte para acessórios; E) Modo de suporte para filmagens com pontos de vista baixos; F) Modo de suporte para filmagens com pontos de vista muito baixos .....	51
Figura 3.2: Configuração do tecido Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack 500gsm .....	53

Figura 3.3: Fotomicrografia: Aspeto longitudinal dos filamentos PLA/Linho num fio aplanado de tecido Biotex .....	53
Figura 3.4: Processo de consolidação da placa de laminado na prensa hidráulica de pratos quentes: A) Camadas de tecido sobre a prensa; B) Prensa fechada durante o processo de consolidação; C) Aspeto da placa com o plástico moldante após a abertura da prensa; D) Aspeto da placa consolidada. ....	54
Figura 3.5 e 3.6: Processo de maquinação CNC dos componente estruturais.....	55
Figura 3.7: Aspeto de um dos componentes logo após a maquinação CNC.....	55
Figura 4.1: Provete apoiado na máquina equipada com respetivo suporte ajustado, pronto para a realização do ensaio de flexão.....	58
Figura 4.2: Curvas de tensão-deformação geradas pelos ensaios de flexão.....	59
Figura 4.3: Provete instalado na máquina equipada com as respetiva amarras.....	61
Figura 4.4: Aspeto da fratura de uma amostra usada após ensaio de tração .....	61
Figura 4.5: Curvas de tensão-deformação geradas pelos ensaios de tração .....	61
Figura 4.6: Detalhes do aspeto da placa usada na produção das amostras, após a maquinação CNC... ..	63
Figura 4.7: Detalhes do aspeto da placa usada na produção do protótipo, logo após a maquinação CNC .....	64
Figura 4.8: Detalhes do aspeto de um componente retirado da placa à esquerda, logo após a maquinação CNC.....	64
Figura 5.1.: Representação esquemática das fronteiras do sistema da ACV relativo ao Cenário A - biocompósito (esquerda) e Cenário B - PRFV (direita).....	70
Figura 5.2: Fluxo de processos envolvidos na produção de filamentos de linho assedado .....	74
Figura 5.3: Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente com o Cenário B - valores relativos em percentagem (%) .....	77
Figura 5.4: Normalização dos resultados dos impactos do Cenário A comparativamente ao Cenário B.....	78
Figura 5.5: Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente com o Cenário B (Tecidos) - valores relativos em percentagem (%) .....	79
Figura 5.6: Normalização dos resultados dos impactos da produção de Tecido de PLA+Fibras de Linho, comparativamente com Tecido em PP+Fibras de Vidro.....	80
Figura 5.7: Caracterização dos resultados dos impactos da produção de Fibras de Linho comparativamente com Fibras de Vidro. Valores relativos em percentagem (%) .....	80
Figura 5.8: Caracterização dos resultados dos impactos da produção de PLA comparativamente com PP. Valores relativos em percentagem (%).....	81
Figura 5.9: Caracterização dos resultados dos impactos da produção de PLA comparativamente com PP, PA 66 e PC. Valores relativos em percentagem (%) .....	81
Figura 5.10: Contribuição dos processos envolvidos na produção de tecidos de Linho+PP (Cenário A), para o indicador de Aquecimento Global.....	84

# Índice de Tabelas

---

Tabela 2.1: Compromisso de redução ou limitação quantificada de emissões, definidas no Protocolo de Quioto por algumas das partes (países) (Adaptado de [15]) .....	09
Tabela 2.2: Propriedades físicas e mecânicas típicas do PP comparativamente com PLA [21],[33],[38].....	33
Tabela 2.3: Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e fibras de vidro [23],[41] ...	37
Tabela 2.4: Comparação entre fibras naturais vegetais e fibras de vidro (Adaptado de [40]) .....	37
Tabela 2.5: Visão geral de tecnologias de reciclagem para diferentes tipos de compósitos (Adaptado de [59]).....	47
Tabela 4.1: Geometria e dimensão das amostras usadas nos ensaios de caracterização mecânica..	58
Tabela 4.2: Propriedades do material estudado à flexão.....	60
Tabela 4.3: Propriedades do material estudado à tração .....	62
Tabela 4.4: Propriedades de laminados produzidas com o tecido híbrido Biotex Flax/PLA 4x4 hopsack, moldados por compressão e testados à temperatura ambiente [73] .....	64
Tabela 4.5: Propriedades dos compósitos considerados para comparação [72-76] .....	66
Tabela 5.1. Mix energético detalhado e síntese dos dados usados na modelação do inventário relativo à origem da energia elétrica consumida em Portugal .....	73
Tabela 5.2. Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente ao Cenário B .....	77
Tabela 5.3. Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente com o Cenário B (Tecidos).....	79

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco*

# Nomenclaturas, siglas e abreviaturas

---

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CNC	Controlo numérico computadorizado
CNUAD	Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e o Desenvolvimento
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EDP	Energias de Portugal, S.A.
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	Poliamida
PA66	Poliamida 66 (Nylon 66)
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PET	Politereftalato de etileno
PHA	Polihidroxialcanoatos
PLA	Ácido Poliláctico
PP	Polipropileno
PRFV	Plástico Reforçado com Fibras de Vidro
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinilo
TPS	Amido Termoplástico (do inglês: <i>Thermoplastic Starch</i> )
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
WCED	<i>World Commission on Environment and Development</i>
WCS	<i>World Conservation Strategy</i>
WWF	<i>World Wildlife Fund for Nature</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silício (sílica)
CaO	Óxido de Cálcio

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de Alumínio (alumina)
$\text{B}_2\text{O}_3$	Óxido de Boro
$\text{SO}_2$	Dióxido de enxofre
$\text{NO}_x$	Óxidos de nitrogénio
$\text{PO}_4$	Fosfato
CFC's	Clorofluorcarbonetos
1,4-DB	1,4 diclorobenzeno
K / $\text{K}_2\text{O}$	Potássio / Óxido de Potássio
N	Azoto ou Nitrogénio
P / $\text{P}_2\text{O}_3$ / $\text{P}_2\text{O}_5$	Fósforo / Superfosfato Triplo / Pentóxido de Fósforo
E / $\text{CaCO}_3$	Calcário Agrícola / Carbonato de Cálcio

GPa	GigaPascal
ha	Hectare
kg	Quilograma
kN	QuiloNewton
$\mu\text{m}$	Micrómetro
$\text{m}^2$	Metro quadrado
mm	Milímetro
$\text{mm}^2$	Milímetro quadrado
$\text{mm}^3$	Milímetro cúbico
MPa	MegaPascal
N	Newton

# 1 Introdução

---

## 1.1. Enquadramento teórico

O desenvolvimento e subsistência das sociedades está estreitamente relacionado com os recursos existentes e a sua acessibilidade. Dada a maior consciência de que os recursos naturais são limitados e das implicações negativas que a depleção dos recursos abióticos, entre outros impactos ambientais, poderão vir a gerar, torna-se cada vez mais inevitável uma maior dependência de recursos naturais que sejam renováveis. A criação de leis ambientais mais exigentes e a consequente procura de alternativas tem impulsionado a investigação e desenvolvimento de materiais provenientes de matérias-primas renováveis abundantes e economicamente viáveis que exijam processos de transformação mais simples e menos prejudiciais para o ambiente, sendo que estes requisitos podem ser encontrados em alguns materiais de origem natural renovável, como por exemplo os novos materiais compósitos reforçados com fibras naturais. As crescentes preocupações ambientais têm vindo, deste modo, a impulsionar a procura de materiais biobaseados e biodegradáveis com boas performances, capazes de substituir alguns materiais sintéticos e que possam reduzir diversos tipos de impactos ambientais. Alguns biopolímeros e fibras naturais vegetais podem apresentar-se como solução viável com numerosas vantagens para um desenvolvimento sustentável [1], [2].

Este modelo de desenvolvimento assenta na necessidade de políticas mais ecológicas como base para um desenvolvimento sustentável da economia e da sociedade, dado que a relação entre o desenvolvimento económico e social e o meio ambiente são variáveis que devem ser inevitavelmente conciliadas de forma equilibrada e equitativa, dado que a degradação ambiental conduz inevitavelmente à deterioração do desenvolvimento económico e social, que conduz consecutivamente à pobreza e à instabilidade social [1], [2].

A produção de fibras naturais e de compósitos derivados podem contribuir para o desenvolvimento da indústria em áreas rurais com forte tradição agroflorestal, contribuindo consequentemente para a criação de emprego. O potencial económico e ambiental destes materiais, são alguns dos principais âmbitos de interesse no desenvolvimento e aperfeiçoamento dos mesmos, podendo surgir como uma resposta ao desenvolvimento económico e social dos meios rurais, sobretudo em regiões pobres ou em desenvolvimento. Além das fibras naturais também os biopolímeros como o PLA, produzidos a partir de plantas como por exemplo milho, beterraba, cana de açúcar, trigo, tapioca e da celulose podem representar semelhante importância. Estes materiais são promissores em termos de sustentabilidade e, embora a produção de fibras naturais e materiais derivados não resolvam os problemas destas regiões, poderão reduzi-los [3].

As fibras naturais apresentam inúmeras vantagens face às fibras sintéticas em aplicações não estruturais ou semiestruturais em que o elevado desempenho não seja um requisito, podendo mesmo substituir as fibras de vidro em algumas aplicações que não exijam elevado desempenho mecânico ou uma elevada resistência química. Algumas dessas vantagens são a sua baixa densidade e baixo peso específico, boas propriedades mecânicas, baixo custo e vasta disponibilidade geográfica, e ainda o facto possibilitarem a captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> por fotossíntese na fase de cultivo, o fácil processamento e baixo custo de investimento e ser um recurso renovável, são ainda biodegradáveis e passíveis de reciclagem térmica com recuperação de energia, possuindo vantagens notáveis do ponto de vista ambiental e ecológico. As fibras naturais e os materiais compósitos formados pelas mesmas encontram atualmente inúmeras aplicações sobretudo na indústria automóvel e na construção civil [3],[2].

No respeitante às fibras naturais e no que concerne às fibras de linho, a produção de linho, apesar de ser hoje uma atividade quase abandonada em Portugal, assume uma grande importância em países produtores na Europa. O potencial de cultivo de linho em Portugal é bastante alto, com rega ou sem rega, sendo que o país possui diversas áreas com elevado potencial agrícola e vastas áreas equipadas para irrigação que se encontram efetivamente irrigadas nos últimos anos, incluindo diversas regiões rurais do território [4-6].

Apesar de a seleção de materiais que minimizam os impactos ambientais requerer à partida uma análise do ciclo de vida desses mesmos materiais, a seleção com fins ecológicos e as considerações relativas à reciclagem são fatores que podem apresentar vantagens enquanto ferramenta de marketing. Os produtos podem beneficiar da aparência natural das fibras naturais para melhorar a sua imagem e para reforçar a ideia de que são “produtos verdes” ou mais ecológicos. Sendo que o bom desempenho ambiental de um produto é um dos fatores indispensáveis para a atribuição de um rótulo ecológico, melhorando por consequência a

competitividade do produto no mercado. Além disso a aplicação de técnicas de gestão ambiental e de rótulos ecológicos pode contribuir para a boa imagem do produto no mercado dada a importância crescente que as questões ambientais têm vindo a alcançar [1],[4],[7].

Não obstante, a seleção de materiais que minimizem os impactos ambientais requer à partida uma análise do ciclo de vida desses mesmos materiais, ou numa primeira instância, exige examinar a fase do ciclo de vida que mais contribui para reduzir esses mesmos impactos. A aplicação de fibras naturais em materiais compósitos não o torna automaticamente um material sustentável ou com melhores características ambientais, de facto esta ilação só poderá ser tomada após uma análise cuidada e com suporte científico. Um dos métodos que permite suportar tal análise é a ACV, uma ferramenta que tem por finalidade analisar e avaliar os impactos ambientais associados a um determinado produto (entendido como bem ou serviço) ao longo de todo o seu ciclo de vida, possibilitando uma visão abrangente dos impactos decorrentes dos processos envolvidos na sua produção. Permite assim determinar a carga ambiental, associada às fases de todo o ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas, fabrico, distribuição, uso e destino final, através de uma caracterização detalhada dos processos envolvidos e conferindo dados úteis para uma eficiente gestão do ciclo de vida do produto [1].

## **1.2. Motivação e objetivos**

A escolha do âmbito do projeto foi motivada pelas preocupações ambientais existentes, considerando aspetos relacionados com o desenvolvimento sustentável e contextualizando a abordagem em Portugal continental.

O objetivo da presente dissertação visa avaliar os potenciais impactos ambientais derivados do fabrico de um suporte multifuncional de câmaras de vídeo produzido com um biocompósito de matriz polimérica de ácido poliláctico (PLA) reforçado com fibras naturais de linho, comparativamente com o mesmo produto produzido com polipropileno (PP) reforçado com fibras de vidro. Pretende-se assim entender as vantagens e desvantagens em termos ambientais associadas à aplicação deste tipo de materiais em componentes de produtos similares, partindo do princípio de parte da matéria-prima utilizada no fabrico do compósito e o produto é maioritariamente produzido e fabricado em Portugal continental.

Com o fim de garantir uma maior coerência e objetividade ao longo de todo o trabalho e dado que não se obteve a colaboração de fabricantes, a metodologia adotada visa o desenvolvimento do produto acima referido baseado em produtos existentes, assim como, o fabrico de alguns dos seus componentes e a caracterização mecânica do material biocompósito utilizado, para melhor entender as potencialidades do material e as possíveis dificuldades adjacentes aos

métodos de fabrico utilizados. A validação dos resultados dos potenciais impactos ambientais associados será conferida através de uma avaliação comparativa do ciclo de vida do produto.

Deste modo, surgem as seguintes questões que serão alvo de investigação:

- Os materiais compósitos reforçados com fibras naturais podem desempenhar um papel importante para o desenvolvimento sustentável. Nesta perspectiva, em que medida a aplicação de um biocompósito em produtos usuais com características semelhantes ao que aqui é tratado poderá representar uma melhoria no desempenho ambiental, por forma a assegurar a preservação ambiental, comparativamente a um outro material compósito sintético?

- Tal como as fibras naturais, os termoplásticos baseados em matérias-primas renováveis, (como é o PLA) são também baseadas em culturas anuais. Mas quais serão realmente as características ambientais destes materiais quando combinados e adaptados a um bem de consumo tal como o produto em estudo, comparativamente com outros termoplásticos como o PP?

### **1.3. Organização da estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em sete capítulos:

- Capítulo 1: presente capítulo onde é realizado um enquadramento teórico do projeto e são apresentadas a motivação, objetivos e a organização da estrutura da dissertação;
- Capítulo 2: dedicado à revisão da literatura, onde é realizado um enquadramento teórico abordando o tema do desenvolvimento sustentável, assim como a contribuição das fibras naturais para o desenvolvimento sustentável, a importância do ecodesign e descrição da ferramenta de ACV. É ainda efetuada uma abordagem aos materiais compósitos, biocompósitos, polímeros e PLA, dando um maior relevo às fibras naturais de linho;
- Capítulo 3: é descrita a metodologia utilizada, incluindo uma breve descrição do desenvolvimento e fabrico do produto;
- Capítulo 4: é apresentada a caracterização mecânica do material biocompósito utilizado;
- Capítulo 5: é descrita toda a metodologia utilizada na concretização da Avaliação Comparativa do Ciclo de Vida do produto em foco, tal como os procedimentos, os resultados e a análise dos mesmos;
- Capítulo 6: é reservado às conclusões gerais relativas a todo o projeto, assim como apresentadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

# 2 Revisão da literatura

---

## 2.1. Sustentabilidade e ambiente

Embora a revolução industrial tenha trazido grandes benefícios para as sociedades, originando um significativo aumento da qualidade de vida, resultou num paradigma de desenvolvimento que tem comprometido o frágil equilíbrio ambiental. Como efeito, a humanidade enfrenta presentemente desafios globais na tentativa de manter o crescimento económico, o bem-estar social alcançado e limitar os impactos ambientais resultantes deste progresso, com vista a alcançar um “desenvolvimento sustentável”.

A presente secção destina-se a uma breve retrospectiva evolutiva das políticas que estão na base do conceito do desenvolvimento sustentável, cuja implementação e o progresso tem sido um processo lento e gradual. Aborda também a implicação de alguns materiais compósitos reforçados com fibras naturais para um desenvolvimento sustentável, particularmente junto das sociedades e economias rurais. Expõe ainda algumas das ferramentas disponíveis para desenvolver produtos (entendidos como bens, serviço ou sistemas) que representem menores impactos ambientais. Ferramentas essas previstas nas técnicas de gestão ambiental, sendo focalizada a ACV, delimitada na série de normas ISO 14040-14049, que permite avaliar os potenciais impactos ambientais e conferir bases para um otimização do ciclo de vida de produtos, promovendo assim uma eficiente gestão ambiental.

### 2.1.1. Desenvolvimento sustentável: evolução do conceito e das políticas

As questões relacionadas com a sustentabilidade do desenvolvimento a um nível global, são reconhecidas na década de 60 do século XX, e alcançam um maior relevo após a publicação do livro “*Limits of Growth*” em 1972. Este livro é resultado de um trabalho de investigação solicitado

pelo “Clube de Roma”, uma sociedade informal não governamental de personalidades independentes com relevo internacional, nas áreas da política, ciência, negócios e cultura, que se reúne desde a sua fundação em 1968, para discutir preocupações globais relacionadas com o futuro da humanidade e do planeta. O estudo aborda questões diretamente associadas ao desenvolvimento da humanidade, relacionando variáveis fundamentais a esse desenvolvimento, como os recursos naturais, o crescimento exponencial da população, a produção de alimentos e a industrialização. Através de simulações computacionais são definidos os efeitos da pressão antropogénica, concluindo-se que o crescimento baseado no progressivo consumo de recursos naturais, não é sustentável ao planeta, condicionando assim a própria existência humana. Os dados revelados têm um grande impacto generalizado, junto da comunidade científica, política e opinião pública, das sociedades mais industrializadas [1], [8].

No mesmo ano, a Organização das Nações Unidas (ONU), manifesta também interesse pela problemática exposta, e realiza uma conferência subordinada ao tema “*Ambiente Humano*”, que tem lugar em Estocolmo em junho de 1972, e origina a “Declaração de Estocolmo para o Ambiente Relacionado com a Humanidade”. Esta constitui um conjunto de princípios orientadores, em que se considera a necessidade de uma visão e princípios comuns para inspirar e guiar os povos do mundo, na preservação e melhoria do ambiente [9].

Posteriormente, o debate em redor do tema desenvolve-se, e no contexto internacional surgem diversas organizações específicas, concentradas em definir soluções para os problemas ambientais. Uma das organizações a destacar, a “União Internacional para a Conservação da Natureza”, prepara o importante documento intitulado “*World Conservation Strategy*” (WCS), com o aconselhamento, cooperação e assistência financeira do “*United Nations Environment Programme*” (UNEP), do “*World Wide Fund for Nature*” (WWF), a colaboração da “*Food and Agriculture Organization of the United Nations*” (FAO) e da “*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*” (UNESCO). O documento menciona o conceito de “Desenvolvimento Sustentável”, e serve como referência ao posterior relatório de Brundtland. O documento é introduzido da seguinte forma:

*“A humanidade, na sua busca pelo desenvolvimento económico e usufruto das riquezas da natureza, deve chegar a um acordo com a realidade da limitação de recursos e a capacidades dos ecossistemas, e deve ter em conta as necessidades das gerações futuras (...) se o objetivo de desenvolvimento é proporcionar bem-estar social e económico, o objetivo da conservação é assegurar a capacidade da Terra para manter o desenvolvimento e suportar toda a vida” [10].*

Este excerto revela genericamente, a forma como o documento trata a questão do desenvolvimento, considerando-o indissociável do conceito de conservação, reforçando ainda o dever ético das gerações presentes na gestão eficiente e responsável dos recursos e da utilização da

biosfera. O conceito de desenvolvimento surge assim associado inevitavelmente à sustentabilidade:

*“Este é um tipo de desenvolvimento que proporciona melhorias reais na qualidade de vida humana e, ao mesmo tempo conserva a vitalidade e diversidade da Terra. O objetivo é um desenvolvimento que seja sustentável. Hoje pode parecer visionário, mas é atingível. Para cada vez mais pessoas parece ser também, a nossa única opção racional” [10].*

O objectivo da WCS é de ajudar a promover a concretização de um desenvolvimento sustentável. A estratégia é delineada nos seguintes passos: i) esclarecer a contribuição da conservação dos recursos vivos para a sobrevivência humana e para o desenvolvimento sustentável; ii) identificar as questões prioritárias para a conservação e os principais requisitos para lidar com elas; iii) propor formas eficazes para alcançar o objetivo da estratégia. É um documento útil e completo pois além de facultar dados esclarecedores, fornece ainda sugestões concretas para estratégias a adotar, visando integrar o meio ambiente, e a conservação dos recursos no planeamento do desenvolvimento. Prevê ainda a atuação dos governos de diversos países na realização das suas próprias estratégias nacionais de conservação, destinadas a resolver os problemas ambientais [10].

No mesmo período a ONU estabelece três comissões independentes que visam enfrentar os problemas globais relacionados com o meio ambiente a segurança e a desigualdade entre os povos mais ricos e os mais pobres. A comissão que prossegue o debate das questões ambientais constituiu-se em 1984, e é designada de “Comissão Internacional para o Ambiente e o Desenvolvimento” WCED (do inglês: *World Commission on Environment and Development*), conhecida também como comissão Brundtland, por ser liderada pela então primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland. O termo “desenvolvimento sustentável” torna-se mais conhecido e relevante após a publicação do primeiro documento da WCED, conhecido igualmente como Relatório Brundtland intitulado “Nosso Futuro Comum” (*Our Common Future*). Este relatório é apresentado em 1987, após a análise e considerações de diversos representantes de várias nações, e propõe as bases do desenvolvimento sustentável como:

*“o desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e económico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais” [11].*

Neste sentido, o princípio de desenvolvimento assenta numa conceção mais ampla e centra-se fundamentalmente na “pessoa”, englobando o bem-estar das gerações atuais e futuras e a conservação dos recursos naturais e da biosfera, em consonância com o desenvolvimento económico e social. A

comissão identifica a relação entre o desenvolvimento económico e o meio ambiente como duas variáveis comuns e, entende que a degradação ambiental conduz inevitavelmente à deterioração do desenvolvimento económico e social, que conduz consecutivamente à pobreza e à instabilidade social. O relatório aponta ainda como causas principais da insustentabilidade do desenvolvimento e da crise ambiental, o consumismo extremo dos países do norte e a pobreza dos países do sul.

A WCED é assim encarregue de estruturar a conhecida “*Agenda global para a mudança*”, propondo estratégias ambientais a longo prazo “*até o ano 2000 e além*” com metas concretizáveis e ambiciosas, pois é entendido que alcançar um desenvolvimento sustentável é um processo vasto e demorado. A comissão recomenda então práticas de prevenção e cooperação entre nações com diferentes níveis de desenvolvimento, considerando procedimentos e recursos através dos quais a comunidade internacional pode trabalhar eficientemente sobre os problemas ambientais e empenhar-se em despertar a consciência global para os problemas ambientais. Com uma posição crítica e objetiva face à insustentabilidade dos paradigmas de desenvolvimento vigorantes na altura, o relatório dá início a uma série de ações que antecedem a “Agenda 21” [1], [11].

Com o intuito de dar seguimento ao trabalho até então realizado, tem lugar no Rio de Janeiro em 1992, vinte anos após a Conferência de Estocolmo, a “Conferência das Nações Unidas para o Ambiente e o Desenvolvimento” (CNUAD), também conhecida como a “Cimeira da Terra” ou “Rio 92”. Desta conferência resultam os seguintes documentos: “Agenda 21”, “Declaração do Rio sobre Ambiente e Desenvolvimento”, “Declaração de Princípios sobre Florestas”, “Convenção sobre Biodiversidade” e “Convenção sobre Alterações Climáticas” [12].

É de notar que, apesar da divergência entre os estados, a “Declaração do Rio sobre Ambiente e Desenvolvimento” encerra uma grande importância política, por preconizar um desenvolvimento equitativo atendendo às diferentes realidades entre os povos do norte e sul. Os princípios proclamados pelo dito documento atentam a novos mecanismos de colaboração entre os estados, e a sociedade em geral, exortando que estes ajam em conjunto no sentido de preservar o ambiente, proporcionando o desenvolvimento dos povos e situando simultaneamente o ser humano no centro das preocupações do desenvolvimento sustentável, declarando o direito da “pessoa” “*a uma vida saudável e produtiva, em harmonia com a natureza*” [12].

Outro dos documentos que importa salientar, a “Agenda 21”, resulta da necessidade de criar uma linha de ação de âmbito global, que deriva dos trabalhos realizados anteriormente e culmina com o relatório de Brundtland. Consiste num processo que prevê bases para a ação, incentivando assim o apoio da mobilização a nível local e regional, reforçando a importância do papel das autoridades locais. Este documento introduz medidas concretas de âmbito estratégico, versando questões financeiras, políticas e de supervisão. Determina como cada um dos países envolvidos deve agir individual e globalmente, de forma concertada e localmente junto dos diversos agentes da sociedade, com a finalidade de obter soluções orientadas para um desenvolvimento sustentável. A “Agenda 21”

representa assim, um contributo relevante no sentido de solucionar os desequilíbrios entre os países pobres do sul e os países ricos do norte, o consumo excessivo, o controlo demográfico, redefinindo os paradigmas económicos e invocando uma urgente integração entre economia e ambiente [1], [13].

Com o objetivo de assegurar um acompanhamento eficaz e uma participação ativa das diversas nações, após a CNUAD, e ainda em 1992, a Assembleia Geral das Nações Unidas funda a “Comissão para o Desenvolvimento Sustentável”. Esta comissão visa assim, monitorizar as comissões de cada um dos países signatários da CNUAD, e avaliar as suas legislações na perspetiva do cumprimento dos acordos definidos, aos níveis local, regional, nacional e internacional [14].

Posteriormente, a Agenda é revista, na Conferência Rio+5, que ocorre em 1997 na cidade de Nova Iorque, numa sessão especial da Assembleia Geral das Nações Unidas, para analisar e avaliar a implementação da "Agenda 21", resultante da Conferência do Rio em 1992. Este encontro estabelece o ambiente político favorável à aprovação do posterior Protocolo de Quioto que se realiza igualmente em 1997 [1].

O Protocolo de Quioto consiste num tratado internacional integrado na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas. Contrariamente à “Agenda 21”, o Protocolo de Quioto, especifica objetivos quantitativos de redução de emissão de gases responsáveis pelo agravamento do efeito de estufa em pelo menos 5% abaixo dos valores registados em 1990, para o período compreendido entre 2005 e 2012 (primeiro período do compromisso), e em pelo menos 18% abaixo dos níveis de 1990 para o período entre 2013 e 2020 (segundo período do compromisso, definido na “Emenda de Doha” ao Protocolo de Quioto, em 2012). O protocolo assenta no princípio de “responsabilidades comuns mas diferenciadas”, e desta forma, apesar do objetivo global para a redução, são exigidas metas mais rigorosas e mensuráveis à maioria dos países desenvolvidos, tal como se pode observar na Tabela 2.1.

*Tabela 2.1: Compromisso de redução ou limitação quantificada de emissões, definidas no Protocolo de Quioto por algumas das partes (países) (Adaptado de [15]).*

<b>Países</b>	<b>Percentagem do ano base ou período</b>
Austrália	108%
Canadá	94%
Croácia*	95%
Hungria*	94%
Islândia	110%
Japão	94%
Nova Zelândia	100%
Noruega	101%
Polónia*	94%
Federação Russa*	100%
Estados Unidos América	93%
União Europeia	92%

*\* Países em processo de transição para uma economia de mercado.*

Não obstante, apesar das metas definidas, alguns dos países não assinam ou ratificam o protocolo, deste modo, o tratado entra então em vigor apenas a partir de 2005, uma vez que existe uma cláusula exigindo a ratificação de pelo menos 55 países desenvolvidos que contabilizaram pelo menos 55% das emissões de CO<sub>2</sub> em 1990. Apesar de polémico, tal como acontece com outras partes envolvidas a nível global, a União Europeia também estabelece diferentes metas para cada estado-membro em função do seu nível de desenvolvimento, com o intuito de assegurar a integridade do desenvolvimento económico [15], [16].

No ano de 2002, decorre em Joanesburgo, África do Sul, a “Conferência Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável”, conhecida igualmente como “Rio+10”. A conferência serve para realizar um balanço dos resultados alcançados, monitorizar as ações tomadas por cada um dos países e avaliar as iniciativas tomadas até então com o objetivo de identificar e resolver os constrangimentos que estejam a impedir a prossecução das ações idealizadas desde a cimeira da terra em 1992 e, definir ainda soluções para os novos desafios. Uma vez mais se consigna a importância do desenvolvimento sustentável enquanto um desenvolvimento integrado baseado nos três pilares que se reforçam mutuamente: desenvolvimento económico, desenvolvimento social e proteção ambiental. O amplo conceito é incorporado no Plano de Implementação de Joanesburgo, reforçando a necessidade de integrar o desenvolvimento sustentável nas ações de todas as instituições a um nível transversal, considerado nas decisões políticas e na mobilização de fundos, através das Nações Unidas e das instituições financeiras com âmbito regional, nacional e internacional.

Em 2012, realiza-se uma nova Conferência Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, também conhecida como “Rio+20”, que decorre na cidade do Rio de Janeiro, assinalando os vinte anos da Cimeira da Terra de 1992. A conferência formula três objetivos: Garantir um compromisso político renovado para o Desenvolvimento Sustentável; Avaliar o progresso e as lacunas que ainda existem na implementação dos compromissos já acordados; e Enfrentar desafios novos e emergentes. Incide sobre dois principais temas: “Uma economia verde no contexto do desenvolvimento sustentável e da erradicação da pobreza” e o “Quadro institucional para o desenvolvimento sustentável”, destacando sete áreas que requerem atenção prioritária: empregos e inclusão social, energia, cidades sustentáveis, segurança alimentar e agricultura sustentável, água, oceanos, desastres e sociedades resilientes [17].

O termo “economia verde”, associado ao primeiro tema, substitui o conceito de “ecodesenvolvimento” que foi sendo utilizado desde a conferência do Rio em 1992. Este consiste no cruzamento entre economia e ambiente, uma economia verde, possibilita um desenvolvimento sustentável em termos ambientais e sociais, ajustando desta forma, o bem-estar das pessoas à proteção ambiental, por intermédio de processos que promovem a igualdade social, a erradicação da pobreza, e protegem simultaneamente o meio ambiente [17].

O tema “Quadro institucional para o desenvolvimento sustentável” tem como finalidade criar uma reforma na governação global dos assuntos relacionados com o Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, e determinar medidas que possibilitem aos países e à ONU selecionar instrumentos e práticas de governação favoráveis ao progresso de tornar as sociedades sustentáveis [17].

Com objetivo de garantir um compromisso político renovado para um Desenvolvimento Sustentável, desta cimeira resulta igualmente a criação do Fórum Político de Alto Nível sobre o Desenvolvimento Sustentável, que vem substituir a Comissão de Desenvolvimento Sustentável, criada logo após a conferência do Rio em 1992, para acompanhar o desenvolvimento da “Agenda 21”. O Fórum visa providenciar liderança política e recomendações para o desenvolvimento sustentável; Acompanhar e rever o progresso na implementação dos compromissos; Melhorar a integração das dimensões económica, social e ambiental; Dispor de uma agenda focada, dinâmica e orientada para a ação; e Considerar os desafios novos e emergentes. Objetivos complexos de atingir, e devido à sua crucial importância, exige uma representação política relevante [18].

Posteriormente seguiram-se outras ações, sendo que a mais recente, a vigésima primeira “Conferência das partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas” (COP 21), também denominada como “Cimeira do Clima de Paris” decorreu em 2015. Foi assinado nesta conferência um importante acordo universal de luta contra as alterações climáticas com vista a limitar o aquecimento global abaixo dos 2°C até 2100, que visa traduzir a gestão ecológica num acordo com objetivos juridicamente vinculativos e quantificados. Meta ambiciosa no cerne da agenda desta cimeira, em que as medidas acordadas são vistas como decisivas para resolver a divergência entre os países ricos e pobres para controlar o quanto possível as mudanças climáticas, as possíveis catástrofes ambientais e a conseqüentemente ameaça ao desenvolvimento [19].

Finda uma retrospectiva cronológica sumariada acerca da evolução de algumas das políticas relevantes sobre desenvolvimento sustentável e as respetivas medidas adotadas desde as primeiras assembleias das Nações Unidas no século XX, subordinadas aos temas do ambiente e desenvolvimento sustentável. É ainda de salientar que paralelamente aos grandes acontecimentos políticos e, com vista a cumprir muitos dos objetivos delineados nos mais diversos acordos e documentos gerados ao longo dos anos, várias iniciativas aos mais variados níveis são concretizadas. Importa realçar aqui o “Ano Internacional das Fibras Naturais” em 2009, declarado pela Assembleia Geral das Nações Unidas, observando a resolução de uma conferência da FAO anos antes, onde se aprova a proposta para solicitar a seguinte declaração das Nações Unidas:

*“Notando que as fibras naturais desempenham um importante papel no vestuário de toda a população mundial, e além dos usos tradicionais tem aplicações industriais promissoras;*

*Lembrando que grande parte da fibra natural no mundo foi produzida por pequenos agricultores como uma fonte de receita em dinheiro em países em desenvolvimento e com baixos níveis de rendimentos;*

*Desejando focar a atenção mundial sobre o papel que os rendimentos obtidos com a*

*venda e exportação de fibras naturais detém em contribuir para a segurança alimentar e a redução da pobreza da população;*

*Acreditando que, enquanto a produção e o consumo de fibras naturais oferecem benefícios ambientais significativos, devem ser feitos esforços concertados para garantir que esses benefícios não sejam comprometidos por práticas inadequadas;*

*Reconhecendo que houve importantes potenciais parcerias entre participantes das diversas indústrias de fibras naturais;*

*Afirmando a necessidade de aumentar a consciência pública sobre os atributos económicos e ambientais das fibras naturais” [20].*

O objetivo visou despertar a atenção e a consciência mundial sobre a importância que as fibras naturais podem ter para o desenvolvimento em aspetos principalmente relacionados com a erradicação da pobreza e a segurança alimentar, e contribuir assim para a concretização de metas definidas anteriormente [20].

Verifica-se que o conceito de desenvolvimento sustentável é uma abordagem ampla e integrada que se centra numa inevitável conciliação equilibrada e equitativa entre a conservação ambiental e o desenvolvimento económico e social por forma a “*satisfazer as necessidades das gerações presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades*”, assumindo um comprometimento global e intergeracional a longo termo. Fundamenta-se desta forma em três domínios interdependentes, o desenvolvimento económico, o desenvolvimento social e a proteção ambiental (ver Figura 2.1), assentando nestas três variáveis de forma integrada e refutando uma abordagem isolada das mesmas [17].



*Figura 2.1: Sustentabilidade e suas dimensões.*

A adoção de novos modelos de desenvolvimento é inevitável dada a pressão antropogénica sobre o ambiente. Implica que a humanidade considere coletivamente e continuamente as consequências sobre o ambiente, que um desenvolvimento desequilibrado pode gerar, por forma a garantir a sustentabilidade desse mesmo desenvolvimento, pois tal como já referido atrás, a relação entre o desenvolvimento económico e social e o meio ambiente são variáveis comuns, sendo que a degradação ambiental conduz inevitavelmente à deterioração do desenvolvimento económico e social, que conduz consecutivamente à pobreza e à instabilidade social [1], [11].

Concluindo, como se pode observar, para concretização das metas estabelecidas, recorre-se a um paradigma de desenvolvimento que dá ênfase à necessidade de políticas mais ecológicas como elemento-chave para um desenvolvimento sustentável da economia e da sociedade. Os materiais compósitos reforçados com fibras naturais podem assim desempenhar um papel importante como solução a este modelo de desenvolvimento. A questão da importância destes materiais para o desenvolvimento sustentável é abordada no próximo subcapítulo.

### 2.1.2. Implicação dos biocompósitos no desenvolvimento sustentável

Conhecer a proveniência dos materiais, as suas propriedades e o modo como são produzidos e processados, permite uma seleção mais ponderada e adequada, minimizando assim as consequências dos potenciais impactos ambientais adversos.

O consumo dos recursos naturais é cada vez maior, assim como os níveis de poluição. Os impactos ambientais e económico-sociais, negativos ou positivos, são em grande medida resultado da seleção de materiais, sendo que estes desempenham um papel crucial neste esquema de economia e ambiente, em paralelo com o bom uso da tecnologia que também tem uma importância decisiva.

Problemas ambientais tais como o aquecimento global e a depleção dos recursos, tornam essencial a procura de materiais alternativos, fundamentalmente derivados e provenientes de recursos renováveis, mas também requer um aumento na prática de reciclagem [21].

Tratando-se de um sistema fechado, pode considerar-se que os recursos da terra são finitos. A matéria-prima é extraída para produção de materiais, estes materiais são transformados em bens de consumo que após a fase de uso são depositos como lixo, e simplesmente eliminados ou depositados como resíduos em aterros, sendo que parte destes materiais podem ser reutilizados ou reciclados, reintegrando o ciclo de transformação como matéria-prima e reduzindo assim a necessidade de extração de matérias-primas virgens, sejam elas renováveis ou não, completando deste modo o seu ciclo de vida (ver Figura 2.2) [21].

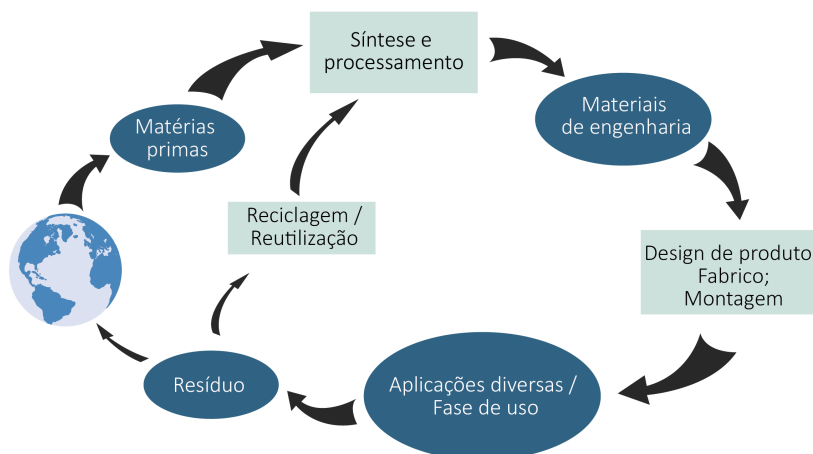


Figura 2.2: Representação esquemática do ciclo de vida dos materiais (adaptado de [21]).

Os materiais baseados em recursos naturais renováveis previnem uma sobrecarga sobre o meio ambiente, sendo que o interesse em compósitos reforçados com fibras naturais tem crescido como resultado das preocupações ambientais. Estes materiais, tais como por exemplo as fibras naturais, são oriundos das mais diversas regiões do mundo e produzidas com base em culturas nativas anuais, as quais podem ser intensificadas com métodos agrícolas mais produtivos, podendo representar a criação de emprego e o consequente desenvolvimento dos meios rurais. Além das fibras naturais também os biopolímeros como o PLA, produzidos a partir de plantas como por exemplo milho, beterraba, cana de açúcar, trigo, tapioca e da celulose, podem representar semelhante importância. Alguns destes materiais e seus derivados podem contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais e para a promoção do desenvolvimento económico-social de determinadas regiões, contribuindo por conseguinte para a promoção de um desenvolvimento sustentável [22-24].

As fibras naturais e os seus compósitos são vantajosos para determinado tipo de mercados que exigem baixos custos, materiais biodegradáveis e derivados de matérias-primas renováveis e não exclusivamente de materiais de alto desempenho, tal como por exemplo, alguns materiais de reforço não estruturais para a indústria automóvel ou materiais de isolamento na construção civil. O uso deste tipo de materiais aliados a tecnologias e produção atuais pode resultar numa redução de resíduos e num aumento da eficiência energética que vai de encontro aos objetivos de um desenvolvimento sustentável [3], [23].

A tecnologia é igualmente um fator de grande relevância na melhoria da eficiência da produção e das condições de trabalho, dado que a produção agrícola e o processamento de matéria-prima exigem um grande esforço de mão-de-obra que pode ser aliviado com recurso à tecnologia. Contudo, existem vários fatores que dificultam a implementação de tecnologia, uma vez que as indústrias rurais mais isoladas mantêm-se praticamente inalteradas há centenas de anos. A tecnologia e o conhecimento são baseados na transmissão oral e encontram-se bastante consolidados na cultura dessas populações, tornando-se difícil a implementação de novos conhecimentos. Além disso, algumas destas indústrias rurais detêm ainda um carácter familiar, destinando-se a suplantarem as necessidades primárias através dos mercados locais, sendo que o lucro fica para as famílias e dificilmente se obtêm lucros suficientes para investir em inovação. Outro fator responsável para que estas indústrias se mantenham praticamente inalteradas está relacionado com o isolamento geográfico destas regiões, limitando bastante o acesso aos centros de conhecimento, além de que a tecnologia dificilmente é adaptada a este tipo de meios, ficando muito dependentes do recurso a ajudas externas para se desenvolverem [22].

Não obstante, tais questões podem ser resolvidas através da transferência de tecnologia, com ajuda e parceria das regiões mais desenvolvidas, envolvendo a partilha de conhecimentos, a melhoria do acesso ao ensino e regulamentação que facilite a comercialização dos produtos, por forma a tornar estas indústrias competitivas e passíveis de incorporar mercados mais abrangentes,

além de potenciar uma melhoria da cadeia produtiva [22].

Em suma, as oportunidades de crescimento da produção agrícola e desenvolvimento da indústria de produção de fibras naturais e compósitos reforçados com estas fibras podem gerar benefícios significativos [22].

### **Potencial de desenvolvimento económico**

As questões económicas encontram-se interligadas com fatores tais como a tecnologia, capacidade produtiva, competitividade, o valor dos produtos e políticas locais e nacionais. As regiões rurais continuam a caracterizar-se por subsistirem fundamentalmente da agricultura, as sociedades agrícolas bem-sucedidas podem prosperar e desenvolver-se, fabricando bens que mais facilmente satisfazem as necessidades locais. Dado que a produção de fibras naturais pode ser realizada por mão-de-obra local e conhecimento tradicional. E tendo em consideração que esta exige um baixo custo de investimento, será passível de produzir em países com baixos níveis de rendimento, ao contrário das fibras sintéticas [3], [22].

Assim, as oportunidades de crescimento da produção agrícola e desenvolvimento da indústria de produção de fibras naturais e derivados, podem representar um maior volume de trabalho e o conseqüentemente aumento de emprego e do capital financeiro. Esta oportunidade permite o acesso a materiais produzidos localmente e proporcionais ao seu poder de compra, podendo assim representar uma solução viável para reduzir o uso de outros materiais, diminuindo a dependência da importação dispendiosa de materiais, potenciando as economias locais e por consequência o desenvolvimento social. Além disso, o baixo custo do produto final e alargada vasta gama de aplicações tornam-no num material competitivo à partida [22].

### **Justiça e Desenvolvimento Social**

Os benefícios destes materiais podem ir muito além dos benefícios económicos e desempenhar uma importante função para as questões sociais, contribuindo para uma melhoria na saúde, segurança, acesso à educação e promovendo uma melhoria no bem-estar destas comunidades. De facto, representa um aumento da segurança para os trabalhadores e população em geral, dado que ao contrário das fibras sintéticas, as fibras naturais reduzem significativamente a exposição a substâncias perigosas e a riscos associados de toxicidade humana (sem riscos para a saúde se inaladas e sem irritações para a pele). O processamento das fibras naturais é sobretudo mecânico e o contacto com produtos químicos tóxicos é insignificante. Além disso, os produtos são relativamente leves, reduzindo o esforço físico do trabalho.

A produção de fibras, localmente em regiões remotas e subdesenvolvidas, onde os materiais de construção necessitam de ser importados e se tornam naturalmente dispendiosos, pode ser uma solução viável para atenuar tal problema e melhorar a qualidade de vida dessas populações. Pode ainda

originar o desenvolvimento das vias de acesso e a melhoria dos transportes para essas regiões [3], [22].

## **Proteção Ambiental**

Os benefícios da produção de fibras naturais e de materiais derivados são numerosos, podendo representar uma carga ambiental mais reduzida como consequência da:

- Redução de carbono atmosférico, permitindo um ciclo fechado de carbono, como resultado da captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> por fotossíntese;

- Redução dos consumos de energia, devido ao seu fácil processamento, sendo que as fibras naturais requerem menores quantidades de energia (apenas cerca de 20% a 40% do consumo energético), comparativamente com fibras sintéticas, potenciando a redução das emissões de gases com efeito de estufa;

- Redução do consumo de combustíveis associados ao transporte, dado que estes materiais apresentam menor peso;

- Redução da dependência de matéria-prima proveniente de recursos não renováveis, substituindo materiais derivados de petroquímicos ou minerais por recursos renováveis, reduzindo a depleção dos recursos abióticos;

- Melhoria da eficiência do ciclo de vida, sobretudo no fim de vida, dado o facto de serem biodegradáveis e possibilitarem a reciclagem térmica com recuperação de energia;

- Preservação das florestas autóctones visto que os compósitos reforçados com fibras são um bom substituto para a madeira, reduzindo a necessidade do abate de árvores, preservando por consequência os ecossistemas e a biodiversidade. Contudo, há que ter em mente que um aumento das plantações anuais de fibras também podem resultar na desflorestação para aquisição de espaço para as culturas, e além disso, a utilização e emissão de fertilizantes e agrotóxicos nos campos pode originar o aceleração da eutrofização, a ecotoxicidade aquática e dos solos, desequilibrando gravemente os ecossistemas e originando a perda de biodiversidade e dos recursos biológicos. Assim, é importante portanto que estes materiais dependam de um uso assente num sistema de produção sustentável derivada de culturas anuais, com vista a evitar não só a desflorestação assim como outros impactos negativos [3], [22].

### **2.1.3. Ecodesign e a otimização do ciclo de vida de produtos**

O Ecodesign tem por objetivo desenvolver produtos que diminuam o impacto ambiental e contribuam para um desenvolvimento sustentável no sentido lato do termo. É uma abordagem extensa que prevê a conceção do produto de um modo integrado, orientada para os aspetos ambientais. Auxilia-se de diversas ferramentas, sendo que uma delas é justamente a Avaliação do Ciclo de Vida, por ser direcionada ao seu âmbito [1].

Dado que as diversas fases associadas à produção, uso e fim de vida de produtos contam com diferentes níveis de impactos ambientais, a abordagem integrada do ecodesign é decisiva precisamente por considerar um produto na globalidade do seu ciclo de vida, proporcionando a otimização dos processos, com vista a incrementar melhorias do ponto de vista ambiental [1].

Enquanto processo de conceção e desenvolvimento de produto é uma abordagem análoga às demais porém incorpora necessariamente considerações ambientais. Neste sentido considera também os requisitos típicos de outras abordagens de design, tais como a funcionalidade, ergonomia, estética, custo e qualidade, entre outras. A eficácia da implementação dos procedimentos considerados, requer uma abordagem integrada, não devendo restringir-se à divisão de gestão ambiental numa determinada empresa, sendo essencial o envolvimento de todos os intervenientes, sobretudo os envolvidos na estratégia do produto, devendo também incluir-se na política de inovação da empresa [1].

Em termos relacionados com a atividade económica, um processo de Ecodesign deve considerar objetivos de redução de custos, incentivos à inovação e melhoria da qualidade do produto, com consequências favoráveis para a imagem da empresa e do produto. Considerando também fatores como a competitividade e exigências de âmbito ambiental implicadas nas políticas públicas e legislação, tal como a Diretiva 2009/125/EC sobre Ecodesign, em que são definidas regras no âmbito da União Europeia com o propósito de melhorar o desempenho ambiental dos produtos, em termos de gastos energéticos, designadamente dos produtos que tenham influência significativa nos consumos energéticos, tais como eletrodomésticos, janelas ou materiais de isolamento. Esta diretiva encontra-se ainda associada a regras que inviabilizam leis dos estados-membros que visem a restrição do comércio interno no espaço da União Europeia, facilitando a circulação de mercadorias, beneficiando consumidores e empresas, possibilitando o aumento da qualidade dos produtos e por conseguinte a proteção ambiental [1], [25].

O Ecodesign recorre a métodos e ferramentas que garantem a consideração dos aspetos ambientais desde as fases iniciais de um projeto. Estas ferramentas consistem, em manuais de normas, listas de verificação de materiais, aplicações informáticas com bases de dados específicas, matriz MET (materiais, energia, emissões tóxicas), matrizes de compatibilidade de materiais, entre outras. Estas ferramentas fornecem informações detalhadas sobre os aspetos ambientais associados a todo o ciclo de vida do produto [1].

Um processo de Ecodesign envolve estratégias integradas no seio das empresas, refletindo as suas políticas de base. Estas estratégias devem incidir, pelo menos, numa das seguintes fases do ciclo de vida do produto:

- Seleção de materiais de fabrico;
- Distribuição e utilização;
- Fim de vida.

Quanto à fase de seleção de materiais de fabrico, é importante considerar princípios que contribuam para uma diminuição da carga ambiental. Como por exemplo a minimização do uso de substâncias tóxicas; o uso de materiais recicláveis; a redução do uso de materiais; conceção para uma produção eficiente; e uso de materiais reciclados na produção de matéria-prima, com vista à diminuição do desperdício de energia e da extração de recursos naturais, possibilitando vantagens de ordem económica, e a redução dos impactos ambientais resultantes. Adicionalmente, a incorporação de materiais reciclados em novos produtos, viabiliza esta atividade económica, uma vez que contribui para uma maior procura destes materiais, desenvolvendo esse mercado, sendo que a utilização de materiais reciclados é já uma prática comum no sector automóvel há várias décadas e é cada vez mais frequente noutras indústrias [1].

Quanto à fase de distribuição e utilização, existem igualmente princípios que contribuem para uma diminuição da carga ambiental, tais como: a otimização do sistema de distribuição e a redução do impacto durante a utilização. A primeira é exequível através da ponderação de fatores que incluem a embalagem, transporte, armazenamento e logística. Na segunda, as estratégias variam em função do tipo de produto e necessita ser seriamente considerada, dado que em muitos produtos esta é a fase que mais contribui para os impactos ambientais [1].

Relativamente à fase de fim de vida, segundo Ferrão (2009), aplicam-se estratégias diversificadas no âmbito do Ecodesign. A título de exemplo, no contexto da indústria automóvel: o design para o desmantelamento; reutilização; remanufatura; reciclagem; controlo e eliminação do uso de substâncias perigosas; incineração segura (com valorização energética) e eliminação adequada [1].

Pode concluir-se que o Ecodesign é uma abordagem atuante, que engloba inevitavelmente o conceito de ciclo de vida do produto. Visa assegurar que os aspetos ambientais são considerados nas principais fases de conceção e desenvolvimento de um produto, garantindo inclusivamente a ponderação da fase de uso e disposição final do produto. Neste contexto a ACV serve como uma ferramenta com base científica que permite identificar os principais impactos ambientais associados e ajuda a conduzir a escolhas de estratégias de melhoria do produto, de forma a otimizar eficientemente o seu ciclo de vida. Este processo de otimização tem como base o Ecodesign e as vantagens podem ser medidas através de variáveis, como por exemplo, a redução efetiva de custos pela utilização racional dos recursos, pela reutilização ou eliminação de desperdícios através da transformação dos mesmos em energia. Apresenta ainda outras vantagens em termos de competitividade, pois segundo os paradigmas atuais, a adoção de uma distinção ecoeficiente pode apresentar vantagens nos mercados vigentes [1].

#### **2.1.4. Técnicas de gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida**

As preocupações crescentes com as questões ambientais têm vindo a aumentar nas últimas décadas, porém sem se observar uma mudança efetiva nos padrões de consumo. Contudo, têm vindo a ser desenvolvidos esforços no sentido de controlar os impactos ambientais. Neste contexto surgem as normas para a gestão ambiental, que são mecanismos baseados numa série de diretrizes que determinam o âmbito de procedimentos a tomar junto das empresa, no sentido da adoção de uma política ambiental. Estas normas permitem assim avaliar os impactos ambientais e controlar os mesmos, promovendo uma gestão ambiental mais adequada [1].

A Organização Internacional de Normalização (ISO), detém normas sobre gestão ambiental, especificadas na série ISO 14000. Os sistemas de gestão ambiental, estão determinados na norma ISO 14001: “sistemas de gestão ambiental – regras gerais sobre princípios, sistemas e técnicas de apoio”, que abarca instruções gerais para uma adequada implementação de práticas de gestão ambiental e apesar da sua adoção ser de cariz voluntário é hoje amplamente utilizada pelas empresas a um nível nacional e internacional, assumindo-se como requisito em alguns sectores da economia [1].

A série de normas 14000 abrange igualmente normas que tratam assuntos específicos, onde se destacam a ISO 14010-14015, sobre Auditoria Ambiental; ISO 14012-14024, sobre atribuição de Rótulos Ecológicos; e a ISO 14040-14049, que define a Avaliação do Ciclo de Vida. Importa destacar esta última por ser a técnica selecionada para parte experimental da presente monografia [1].

As técnicas de análise ambiental previstas nas normas acima referidas, tal como nas restantes, complementam-se entre si e possuem estruturas dinâmicas que possibilitam a contínua atualização em função das necessidades sucessivamente identificadas nos domínios da gestão ambiental. Importa salientar que a técnica de ACV possui diferenças consideráveis entre as demais visto que possibilita uma análise dos impactos ambientais de um produto na globalidade de todo o seu ciclo de vida sem apresentar limitações de ordem geográfica e temporal, proporcionando simultaneamente uma visão integral e pormenorizada, dado que considera o conjunto de todos os processos e fases relacionadas com o produto em análise [1].

#### **Avaliação do ciclo de vida**

A norma ISO 14040, determina os princípios da ACV e define-os enquanto: “*compilação e avaliação das entradas, saídas e potenciais impactos ambientais associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida*” [26].

A ACV é portanto, uma ferramenta que tem a finalidade de analisar e avaliar os impactos ambientais associados a um determinado produto (entendido como bem ou serviço) ao longo de todo o seu ciclo de vida, permitindo uma visão abrangente dos impactos decorrentes dos processos envolvidos na sua produção. Permite determinar a carga ambiental, associada às fases de todo o ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas, fabrico, distribuição, uso e destino final,

através de uma caracterização detalhada dos processos envolvidos e conferindo dados úteis para uma eficiente gestão do ciclo de vida.

Um conceito relacionado com a ACV é designado na literatura inglesa por “*life cycle thinking*”, fundamenta-se na consciência para a importância de se pensar num produto em termos do ciclo de vida completo, sendo esta uma das principais vantagens decorrentes da aplicação da técnica de ACV. A importância deste fator pode ser explicado pela consciencialização de que frequentemente o emprego de melhorias num determinado processo, pode induzir em efeitos secundários que agravam o desempenho ambiental do produto.

Deste modo, e dado o facto de que a ACV se baseia numa abordagem holística que considera a globalidade dos processos relacionados com todas as fases do ciclo de vida de um produto, esta possibilita uma visão tão completa quanto possível de um sistema e dos consequentes impactos ambientais, proporcionando adicionalmente o impedimento do chamado “problema do deslocamento”. Para se compreender este conceito, deve ter-se em conta que a resolução de um problema ambiental não deve admitir um deslocamento de uma carga ambiental entre fases do ciclo de vida. Exemplificando: a produção de um automóvel em alumínio ao invés de aço poderá significar que a consequente diminuição do peso do veículo reduza o consumo de combustível durante a sua fase de uso, contudo considerando que hipoteticamente a produção do aço requer menos energia do que a produção de alumínio, esta alteração poderia representar um agravamento da carga ambiental em determinadas fases e categorias de impacto. Deste modo, somente quando todas as variáveis são consideradas, é possível perceber-se o grau de eficiência ecológica resultante de alterações num dado sistema. É importante salientar aqui que “sistema” representa a totalidade dos processos envolvidos no ciclo de vida [1], [27].

Apesar de a ACV ser essencialmente uma metodologia quantitativa, os aspetos qualitativos também deverão ser considerados, sobretudo quando não é possível obter dados de outra natureza, na medida em que confere uma visão mais concisa da influência dos elementos em falta [1], [27].

As principais aplicações da ACV incluem: Conceção de novos produtos; Comparação das variantes de melhoria de um determinado produto e processo; Análise das origens dos problemas relacionados com um determinado produto; Proporcionar uma escolha mais informada e categórica entre produtos comparáveis (que cumpram a mesma função). Pode ainda servir como um recurso complementar de gestão estratégica, tanto a nível de negócio como a nível de políticas. O modo como uma ACV é concretizada, depende dos objetivos e do uso pretendido [27].

Para concluir, é importante considerar-se a ACV enquanto ferramenta analítica, que proporciona dados relevantes para apoio à decisão, contudo é essencial entender-se que os resultados de uma ACV não devem ser considerados categóricos, devendo servir somente como base complementar de apoio à decisão, com vista à otimização de processos em áreas de atuação relevantes. A metodologia da avaliação do ciclo de vida é descrita em detalhe no subcapítulo 2.1.5. [1], [27].

## **Limitações da Avaliação do Ciclo de Vida**

O carácter holístico da ACV, além de acrescentar coerência aos dados, revela-se igualmente como uma limitação. Numa primeira instância, a ACV descreve habitualmente os impactos ambientais como "potenciais impactos", isto porque a sua estrutura obedece a processos lineares e atualmente não fornece uma abordagem dinâmica. Além disso, os impactos estão muitas vezes relacionados a uma unidade funcional definida em função de um estudo específico, que dificilmente possibilita extrapolações a um nível tão genérico. Da mesma forma, incide sobretudo nos aspetos ambientais dos produtos, e não se reserva a uma avaliação abrangente das dimensões económicas ou sociais [1], [27].

Outras limitações estão relacionadas com a disponibilidade e adaptabilidade dos dados existentes. Existem diversas bases de dados que disponibilizam alguma informação, contudo muitos desses dados são habitualmente obsoletos, não permitem uma comparação ou adaptação adequada, e por vezes a sua qualidade é desconhecida. A sua falta de adaptabilidade justifica-se pelo facto de os dados serem por vezes disponibilizados como combinações de processos, por exemplo "produção de eletricidade", ou "produção de *pellets* de PP", ao invés de particularizar cada um dos processos constituintes na globalidade de toda a cadeia produtiva [1], [27].

Apesar de a ACV ter uma base científica, prevê escolhas assentes em considerações de ordem técnica e em critérios de valor. Neste contexto, o processo de normalização ISO revela-se indispensável porque ao respeitar critérios unificados evita a disparidade dos resultados. Além disso, impõe a descrição precisa e detalhada das escolhas, que permite uma posterior análise igualmente aprofundada [1], [27].

Para concluir, tal como referido anteriormente, os resultados de uma avaliação do ciclo de vida não devem ser considerados como categóricos, devendo ser utilizados somente como ferramenta de base complementar de apoio à decisão com vista à otimização de processos [1].

## **Ferramentas de apoio**

A ACV envolve uma extensa multiplicidade de dados. É comum uma avaliação típica envolver largos milhares de processos e fluxos relacionados entre si. Nestas condições, é fundamental o recurso à computação e a *software* que processe e correlacione toda a informação de um modo viável, eficiente e que possibilite uma manipulação precisa da informação.

Atualmente estão disponíveis dezenas de aplicações informáticas dedicadas à ACV, alguns destes programas são de uso livre e outros possuem licenças dispendiosas. Os programas de acesso livre, em geral, são mais limitados não integrando funções avançadas, e além disso, possuem bases de dados igualmente mais limitadas. Estas bases de dados são fundamentais para a concretização de uma ACV pois fornecem dados indispensáveis referentes aos processos e também à avaliação dos impactos. Possuem informações detalhadas e essenciais para a estruturação da fase de inventário que de outra forma seriam muito complexas de reunir. Estas aplicações fundamentam-se

naturalmente nas normas que definem a ACV, contudo disponibilizam métodos de cálculo e de avaliação diferentes entre si, assim como bases de dados próprias [1], [27].

Exemplos de *softwares*: *Simapro*, *GaBI*, e ainda *OpenLCA* (livre), entre outros. O *Simapro* é um dos mais utilizados detendo bases de dados extensas e possibilitando uma análise detalhada com recurso a diferentes métodos de avaliação de impacto ambiental. Exemplos de bases de dados existentes: *Ecoinvent* e *ELCD* (livre), da nomenclatura inglesa (*European Life Cycle Database*). Estas bases de dados podem ser importadas nos *softwares* acima citados. A base de dados *Ecoinvent* é uma das mais extensas, sendo utilizada em bastantes países. Esta contém inventários de ciclo de vida com um vasto número de processos industriais e agrícolas, de fornecimento de energia, extração de recursos, elementos químicos, materiais, gestão de resíduos, transportes e distribuição, entre muitos outros processos [28-32].

### 2.1.5. Metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida

A metodologia associada à avaliação do ciclo de vida está delineada na série de normas ISO 14040-14049, onde se encontram definidos os seus princípios e estrutura. O método encontra-se estruturado numa sequência de fases distintas que se relacionam mutuamente (ver Figura 2.3). As fases de definição do **âmbito e objetivo** do estudo; a criação de um **inventário** dos processos envolvidos; a **avaliação dos impactos ambientais associados**; e simultaneamente, a **interpretação** e análise do inventário e da fase de avaliação dos impactos ambientais, com base nos objetivos do estudo [1].

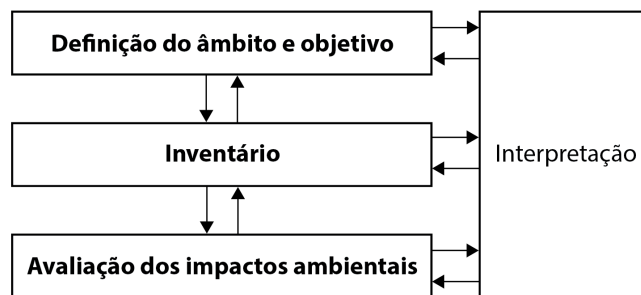


Figura 2.3: Estrutura da avaliação do ciclo de vida (adaptado de [27]).

A ACV tem a finalidade de analisar e avaliar os potenciais impactos ambientais associados a um determinado produto na globalidade do seu ciclo de vida, considerando para isso a caracterização e compilação de todo um conjunto de entradas e saídas de elementos dos diversos processos envolvidos [27].

É habitual a ACV ser abordada somente nas suas duas primeiras fases, denominando-se por Inventário de Ciclo de Vida, mais conhecido pela sua designação em inglês, *Life Cycle Inventory*. Esta abordagem visa uma interpretação dos dados obtidos com o objetivo de otimizar os processos em foco. Pressupõe a quantificação das substâncias relativas aos processos envolvidos

num determinado estudo, assim como os diversos tipos de emissões derivadas, não contemplando a avaliação dos impactos ambientais [1].

### **Definição de Objetivos e Âmbito**

A fase de definição de objetivos e âmbito tem como finalidade constituir as escolhas iniciais que determinam um plano e as bases para uma contínua orientação no decorrer de todas as fases seguintes. Nesta fase são formuladas questões que visam definir e identificar as razões da realização do estudo, o objeto de estudo, qual a função do produto em estudo e a quem se destinam os resultados, mas também a definição do âmbito temporal, geográfico e tecnológico [1], [27].

### **Unidade funcional**

Na sequência da definição dos objetivos e âmbito torna-se necessária a definição de uma unidade que permita quantificar a função de um produto (ou produtos) enquanto objeto de análise. É neste contexto que surge o conceito de unidade funcional.

A unidade funcional tem relação direta com uma função, devendo possibilitar a atribuição de uma medida. Ou seja, deve permitir quantificar a finalidade de uso de um produto, descrevendo o mesmo em termos de função. A partir desta referência será possível determinar os dados do inventário e ter uma referência como base ao longo do estudo, sendo que a sua dimensão é arbitrária.

A título de exemplo, a unidade funcional da produção de uma máquina de café, pode ser “2000 cafés durante um ano”. Outro exemplo, se o objetivo estiver associado ao consumo de sumo de laranja, pode considerar-se como unidade funcional, “a disponibilização de 1000 litros de sumo de laranja ao consumidor” [1], [27].

### **Inventário**

O Inventário consiste primeiramente na projeção de um sistema (ou sistemas) relativo a um cenário(s) em estudo; na esquematização de diagramas de fluxo representativos dos processos abrangidos pelos sistemas estudados; assim como na definição de fronteiras ou limites dos mesmos. Esta fase deve envolver a definição dos pressupostos, o processamento dos dados e análise da sua qualidade. Segundo Ferrão (2009), deve consistir nas seguintes fases: i) Definição das fronteiras do sistema; ii) Esquematização do diagrama de blocos representativo do sistema; iii) Recolha de informação e análise da sua qualidade; iv) Processamento dos dados; e v) Análise dos resultados [1].

Esta fase envolve o agrupamento de toda a informação relativa aos dados de entrada e saída dos processos envolvidos exigindo uma pesquisa intensa e pormenorizada que pode envolver estudos complexos, visitas técnicas, pesquisas na literatura tais como relatórios publicados por entidades oficiais e artigos científicos e, as bases de dados existentes tais como as referidas atrás. Os dados recolhidos resultam num inventário que inclui as entradas e saídas quantificadas relativamente à unidade funcional no que diz respeito a todos os materiais utilizados, produtos e

coprodutos gerados, infraestruturas e maquinarias diversas, consumo de energia, ocupação dos solos, dados relativo a emissões e resíduos, entre muitos outros dados [1], [27].

### **Avaliação dos impactos ambientais e métodos de avaliação**

A fase de avaliação dos impactos ambientais tem como objetivo processar o grande conjunto de dados gerados na fase de inventário, interpretando os mesmos através da sua classificação e categorização. Para tal, deve definir-se uma lista de indicadores de categorias de impacto, juntamente com os métodos que agregam essas mesmas categorias e possibilitam a formulação dos cálculos em função de fatores de ponderação específicos, apresentando os resultados por categoria de impacto ambiental [1], [27].

Com o propósito de assegurar a coerência da metodologia e a possível interpretação da enorme quantidade de dados que são gerados na fase de inventário, são utilizados métodos que permitem incorporar fatores de equivalência para reduzir a informação. Estes métodos recorrem à combinação de fatores de impacto que agrupam esses mesmo fatores por categorias de impacto ambiental, através de uma caracterização dos mecanismos dos sistemas físicos, químicos e biológicos. Estes mecanismos, que também são conhecidos por “mecanismos ambientais”, resultam num conjunto de regras que visam a obtenção de resultados normalizados em função das propriedades desses sistemas. É assim possível quantificar os fatores de caracterização das diferentes categorias e quantificar também os impactos em indicadores intermédios ou indicadores finais. Os primeiros são mais fiáveis e permitem entender como as propriedades da intervenção sobre o ambiente, contudo são mais difíceis de interpretar. Os segundos resultam numa classificação segundo consequências ambientais, o que facilita a sua interpretação [1].

A título de exemplo, algumas substâncias químicas presentes num inventário, tais como gases com efeito de estufa (ex: clorofluorcarbonetos, CFC's), intervêm na diminuição da camada de ozono (indicador intermédio) e por sua vez podem contribuir também para o aumento marginal da mortalidade (indicador final). Ou seja, sistemas físicos, químicos e biológicos identificados no inventário são convertidos numa contribuição para o efeito de um dano ambiental (indicador intermédio), sendo depois determinada a equivalência das consequências dos impactos (indicador final) [1].

A escolha do método a usar na avaliação dos potenciais impactos ambientais deverá ser tomada em função dos objetivos do estudo. Os métodos de avaliação existentes variam, entre outros fatores, no número e propriedades das categorias que integram e na orientação da abordagem que pode ser orientada para problema ou para o dano ambiental. Os métodos orientados ao problema sustentam-se em indicadores intermédios, enquanto os métodos orientados para os danos ambientais estão relacionados com os indicadores finais. Variam assim, no tipo de indicadores e na classificação de categorias de impacto ambiental. Um exemplo desse método: *CML2 baseline 2000* que está baseado em indicadores intermédios, estreitamente relacionados com

as intervenções sobre o ambiente, ou seja, é orientado para o problema, sendo a avaliação dos resultados mais complexa por exigir um maior esforço de interpretação [1].

Os indicadores que permitem categorizar os impactos ambientais e interpretar os mesmos na fase de avaliação utilizando este método são: Depleção de Recursos Abióticos; Acidificação; Eutrofização; Aquecimento Global; Destruição da Camada de Ozono; Toxicidade Humana; Eco-toxicidade dos meios aquáticos (água doce); Eco-toxicidade aquática marina; Eco-toxicidade Terrestre; Oxidação fotoquímica. É ainda possível modificar os métodos adicionando outros indicadores em falta, tal como o uso e ocupação do solo. Segue-se uma breve descrição de cada um dos indicadores das categorias de impacto referidas:

**Depleção de recursos Abióticos:** recursos abióticos são recursos naturais que compreendem recursos não biológicos e não renováveis, ou não regeneráveis durante o período médio de vida de um ser humano, tais como combustíveis fósseis, minerais, metais, e outras matérias. O potencial de depleção abiótica é determinado dividindo a quantidade extraída destes recursos, pelo valor total estimado dos mesmos recursos existentes nas reservas mundiais [27].

**Acidificação:** efeito da emissão de determinadas substâncias para a atmosfera, tais como: SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e NO<sub>x</sub> (óxido de azoto), que conseqüentemente acabam depositadas na superfície da água e do solo. Como consequência, esses meios tornam-se mais ácidos (diminuição do pH), resultando em impactos diversos, tendo igualmente efeito nas águas subterrâneas, nos ecossistemas, organismos biológicos e, até mesmo em materiais estruturais e outros produzidos pelo homem, como por exemplo em edifícios. Resulta portanto na morte de peixes em lagos, na decadência das florestas e na deterioração dos materiais de construção, afetando direta e indiretamente o meio ambiente, a saúde humana e os recursos naturais biológicos. O potencial de acidificação é baseado no efeito de diversos elementos químicos, porém é expresso relativamente ao SO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera (kg equivalente de SO<sub>2</sub>) [1], [27].

**Eutrofização:** resultado do excesso de nutrientes num meio aquático ou terrestre e da conseqüente elevada formação de biomassa (algas). É um processo natural que resulta do envelhecimento de um meio aquático, contudo a emissão de resíduos decorrentes de algumas atividades humanas (adubos, fertilizantes e fugas de fossas sépticas) podem acelerar o processo. A eutrofização/nitrificação resulta na diminuição dos níveis de oxigénio na água por efeito da decomposição da matéria orgânica e conseqüentemente na morte de peixes e outras formas de vida, desequilibrando gravemente os ecossistemas e prejudicando a biodiversidade. Dado que este fator está baseado principalmente no excesso de nitratos e fosfatos que resultam no excesso de fertilização das águas de superfície, o potencial de eutrofização ou nitrificação é expresso como o resultado da quantidade equivalente de Fosfato (PO<sub>4</sub>) emitido para a atmosfera (kg equivalente de PO<sub>4</sub>) [1], [27].

**Aquecimento Global:** consequência do facto de que parte do calor irradiado pela superfície da terra é

refletido pela atmosfera de volta para a terra. A radiação refletida é intensificada pelo efeito da emissão de gases com efeito de estufa na atmosfera, resultando na subida da temperatura à superfície da terra e em impactos negativos sobre os ecossistemas e a saúde humana. Tem vindo a ser registado e prevê-se um incremento gradual da taxa de aumento da temperatura média global que permite antever alterações climáticas significativas no horizonte do ano 2050. O potencial de aquecimento global (GWP, da nomenclatura inglesa, *Global Warming Potential*) é baseado no cálculo da emissão de diversas substâncias com efeito de estufa, porém é expresso relativamente ao equivalente em CO<sub>2</sub> [1], [27].

**Diminuição da camada de ozono estratosférico:** O ozono é um composto que ocorre naturalmente na estratosfera formando uma camada. A redução da sua espessura está relacionada com a emissão para o ar de algumas substâncias, tais como os CFC's. A diminuição da camada de ozono permite que uma maior quantidade de raios ultravioletas da luz solar alcancem a superfície terrestre, resultando em impactos nocivos para a saúde humana e animal. Este fenómeno está associado ao aumento de algumas doenças, como os melanomas e também aos desequilíbrios nos ecossistemas e nos ciclos bioquímicos, afetando a saúde humana, o meio ambiente e os recursos naturais. O potencial de diminuição do ozono é expresso por quantidade equivalente à substância de referência, o CFC-11 [1], [27].

**Toxicidade humana:** resultado da exposição a substâncias tóxicas e consequentes impactos na saúde humana. Resulta da concentração de substâncias tóxicas em quantidades que se possam tornar nocivas. A caracterização desta categoria de impacto é complexa. O potencial de toxicidade humana é determinado com base no contacto e efeitos dos elementos tóxicos, sendo expresso em kg equivalente de 1,4 diclorobenzeno (1,4-DB kg eq) [1], [27].

**Eco-toxicidade:** A ecotoxicidade pode dividir-se fundamentalmente em três sub-categorias de impacto: **eco-toxicidade dos meios aquáticos de água doce; eco-toxicidade aquática marinha; eco-toxicidade terrestre.** Refere-se aos impactos de substâncias tóxicas nos ecossistemas aquáticos de água doce, ecossistemas marinhos e terrestres, atingindo diretamente o meio ambiente natural e os recursos naturais. O potencial de eco-toxicidade é determinado com base nas concentrações de substâncias tóxicas suportáveis pelos sistemas aquáticos e solo e é expresso em kg equivalente de 1,4 diclorobenzeno (1,4-DB kg eq) [1], [27].

**Oxidação fotoquímica:** também conhecida como *smog* de verão, ocorre sob insolação intensa em regiões com emissões significativas para a atmosfera de gases automóveis e industriais. Estes poluentes primários, tais como compostos orgânicos voláteis (VOCs), monóxido de carbono (CO) e óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), reagem por influência da luz ultravioleta e são transformados em compostos poluentes secundários tais como, o ozono e nitrato de peroxiacetil (PAN). Estes poluentes representam grande perigo para a saúde humana e os ecossistemas, danificam as plantas, igualmente os cultivos e por consequência todo o meio ambiente e os recursos naturais biológicos. O Potencial de formação de

ozono fotoquímico é uma medida que é expressa em kg equivalente de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) [1], [27].

**Uso e ocupação do solo:** perda ou indisponibilidade temporária de terras, enquanto um recurso natural e relativo ao meio ambiente. Os impactos da ocupação de terras geram consequências como a privação de recursos e também impactos relacionados com a perda de biodiversidade, como consequência da perda da função que a terra representa como suporte à vida, pela modificação e destruição do solo e pela alteração constante decorrente da colheita dos seus recursos biológicos. O seu impacto é expresso em m<sup>2</sup> de ocupação anual de solo (m<sup>2</sup>.ano) [27].

## 2.2. Compósitos em geral e biocompósitos

Um material compósito, consiste num qualquer material constituído por duas ou mais fases ou componentes, que resulta na combinação das melhores propriedades de cada um, através do chamado princípio de ação combinada. Segundo este princípio, através da junção criteriosa de diferentes materiais obtêm-se novos materiais compostos, com características nitidamente superiores aos seus constituintes, quando separados. A junção engenhosa de metais, cerâmicos e polímeros, permite assim a combinação de características como a rigidez, a dureza, a resistência à corrosão, à degradação e a altas temperaturas, entre outras, alargando as gamas e propriedades dos materiais já disponíveis [21].

Algumas ligas metálicas (multifásicas), cerâmicos e polímeros podem ser considerados materiais compósitos quando constituídos por mais do que um componente com composições químicas distintas, mesmo que sejam de uma escala microscópica ou até mesmo atómica. Vários exemplos de compósitos são igualmente passíveis de encontrar na natureza. O osso, por exemplo, não é mais do que a combinação de materiais com diferentes propriedades: um mineral duro e frágil chamado apatita e o colagénio, uma proteína fibrosa flexível e resistente. Outro exemplo que se encontra na natureza é a madeira, composta essencialmente por fibras de celulose resistentes e flexíveis, unidas pela lignina, uma macromolécula que confere rigidez e impermeabilidade, pela hemicelulose que contribui para a sua elasticidade, além de outros componentes como água e extratos diversos em menor quantidade [21], [33].

A descrição anterior deve entender-se como uma abordagem ao conceito de compósito de uma forma lata. Contudo, no presente contexto, tratar-se-á o conceito de material compósito numa aceção mais restrita à engenharia, na qual os materiais componentes são preferencialmente passíveis de se distinguir a um nível macroestrutural. Por conseguinte, um compósito é um material produzido artificialmente, em que os compostos integrantes são quimicamente heterogéneos e separados por uma interface reconhecida. Neste contexto, e segundo Callister

(2007), a maioria das ligas metálicas e muitos cerâmicos não se enquadram nesta aceção, uma vez que as suas diversas fases são formadas como resultado de um fenómeno natural [21].

Grande parte dos materiais compósitos é constituído por duas fases: a matriz e o reforço. A matriz é fase contínua que envolve o reforço que, por sua vez, confere um acréscimo de resistência ao material. Os compósitos podem ser reforçados por partículas ou por fibras, sendo que as partículas podem possuir diversos tamanhos e graus de dispersão na matriz, enquanto as fibras podem ser contínuas e alinhadas, ou curtas e também alinhadas ou desalinhadas. Adicionalmente, os compósitos ainda podem ser estruturais, como um conjunto de materiais aglomerados num composto com diferentes arranjos geométricos, os chamados painéis-sanduiche, ou simplesmente, uma série de laminados de diferentes materiais aglutinados entre si [21].

Inúmeros materiais assumem este domínio porém, a presente abordagem incidirá essencialmente nos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras, mais especificamente nos biocompósitos, conteúdo que será tratado ao longo do presente capítulo.

## **Biocompósitos**

Os Biocompósitos são materiais compósitos formados por uma matriz e um reforço, ambos de origem natural, ou bioderivados. Grande parte destes materiais tem origem na biomassa. Os biocompósitos evoluíram significativamente na última década, por razões que se devem aos constantes avanços na ciência e a uma crescente consciencialização por parte da opinião pública, motivada por questões ecológicas. Assim, para além das melhorias no desenvolvimento destes materiais, a legislação já existente nalgumas partes do mundo, nomeadamente na Europa, vem impondo o uso criterioso de materiais com características às quais os biocompósitos apresentam uma solução viável, dados os fatores relacionados à sua natureza renovável e biodegradável e ao processamento simples, para além das boas propriedades, tais como a baixa densidade relativa e alta resistência específica. A par disso, o custo dos mesmos tende a tornar-se mais baixo. Como consequência, o uso dos biocompósitos tem vindo a ganhar uma importância cada vez maior [2], [34].

Contudo, há que se considerar as limitações e desvantagens. Do ponto de vista do desenvolvimento, a adesão interfacial entre a matriz e as fibras naturais é um dos fatores que continua a delimitar o desempenho dos biocompósitos, e também, mas em menor grau, dos compósitos com fibras sintéticas, devido essencialmente às características da superfície das fibras. Outra grande limitação tem sido a estabilidade reduzida ao ambiente exterior e a elevada absorção de humidade, dada a vulnerabilidade a elementos climáticos como a temperatura, a humidade e a radiação UV, que provocam a deterioração, deformação e descoloração, e afetam a sua duração a longo prazo. Deste modo, diferentes métodos de tratamento, assim como de fabrico, são estudados e testados atualmente para que se possam ultrapassar estas desvantagens. Cada nova técnica desenvolvida pode ter impactos ambientais desfavoráveis que se deverão considerar igualmente.

No entanto, os benefícios ambientais continuam a ser uma das grandes vantagens de muitos biocompósitos [2].

### **2.2.1. Matrizes poliméricas, biopolímeros e o PLA**

Segundo Callister (2007), a função da matriz é variada. Para começar, deverá ser um material dúctil que una as fibras e lhes transmita a carga aplicada sobre o compósito, uma vez que a carga a que o material é sujeito, é sustentada principalmente pelas fibras. Em seguida, é proteger as fibras do desgaste provocado pela abrasão mecânica e das reações químicas causadas pela exposição ao ambiente. Por fim, serve ainda para separar as fibras entre si agindo como barreira à propagação de fendas entre as mesmas. Além disso, e como já foi referido atrás, é importante considerar a adesão na interface, uma vez que a resistência da ligação matriz-fibra é crucial para o bom desempenho do compósito [21].

Como já mencionado anteriormente, os materiais utilizados como matriz englobam polímeros, metais e cerâmicos. No entanto, os compósitos de matriz polimérica revelam-se os mais versáteis e de uso mais alargado e diversificado.

Polímeros de origem natural, tal como a borracha, a madeira, o couro, o algodão, entre muitos outros, são utilizados pela humanidade há milhares de anos, sustentando a sobrevivência da espécie e o desenvolvimento das sociedades [35].

Os polímeros podem ser originados na natureza, produzidos artificialmente ou sinteticamente. Os que ocorrem na natureza são provenientes de plantas e animais e regulam processos indispensáveis à vida. Incluem as proteínas, os polissacarídeos, como o amido, celulose, glicogénio, entre outros. Os polímeros artificiais, por outro lado, são processados pelo homem por via de transformações químicas a partir de polímeros naturais. Por sua vez, os polímeros sintéticos são obtidos artificialmente a partir de pequenas moléculas orgânicas extraídas de produtos geralmente derivados de petróleo e combinadas com um ou mais aditivos [21], [35].

Quimicamente, os polímeros são substâncias constituídas pela repetição de pequenas moléculas, denominadas de monómeros, que se unem quimicamente entre si por processos de polimerização, formando cadeias moleculares muito longas e dando origem a grandes estruturas moleculares, designadas por macromoléculas. São compostos orgânicos baseados em carbono, hidrogénio e outros elementos não metálicos. Os processos de polimerização distinguem-se pelas características associadas ao mecanismo das reações químicas, sendo as duas principais a polimerização por condensação e a polimerização por adição. A polimerização por condensação, ou passo-a-passo, consiste na reação entre monómeros de diferentes tipos, compreendendo reações químicas intermoleculares por etapas, em que as extremidades das moléculas intervenientes reagem entre si, ligando-se em cadeia e libertando habitualmente um subproduto (pequena

molécula), geralmente água ou amoníaco (ver Figura 2.4). A título de exemplo, o amido e as proteínas são dois tipos de polímeros que ocorrem na natureza pelo processo de condensação, assim como alguns polímeros sintéticos de grande consumo, como o politereftalato de etileno (PET), o policarbonato (PC) e as poliamidas (PA). Em contrapartida, a polimerização por adição consiste na ligação e crescimento em cadeia de unidades moleculares (monómeros) do mesmo tipo, com pelo menos duas ligações entre os átomos de carbono. Envolve um conjunto de etapas que se podem resumir pela ocorrência do rompimento da ligação dupla originando novas ligações simples em cadeia. A borracha natural é um polímero natural que resulta do processo de polimerização por adição. Da mesma forma, grande parte dos polímeros sintéticos consumidos atualmente são obtidos por este método, como é o caso do Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policloreto de vinilo (PVC) e o Poliestireno (PS) [21], [35], [36].

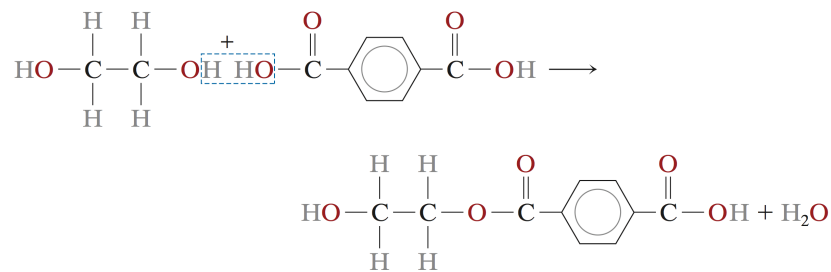


Figura 2.4: Formação de PET, através da combinação entre o Etilenoglicol e Ácido tereftálico [21].

Os materiais poliméricos dividem-se, como mencionado anteriormente, enquanto materiais naturais, artificiais ou sintéticos e podem ser caracterizados segundo a sua disposição final como: plásticos, borrachas, fibras, espumas, adesivos, revestimentos e películas.

A classificação dos polímeros revela-se complexa dado o facto de estes apresentarem uma grande diversidade de estruturas macromoleculares. Por conseguinte, para além da proveniência e dos mecanismos de formação, os polímeros podem classificar-se em diferentes categorias considerando o tipo de estruturas químicas resultantes e os processos de transformação a que são sujeitos, sendo esta uma classificação mais convencional. Deste modo, dividem-se enquanto termoplásticos, termoendurecíveis (resinas) e elastómeros (borrachas) [21], [33], [35].

São classificados de **termoplásticos** os materiais poliméricos que fundem quando aquecidos e recuperam a rigidez inicial à medida que arrefecem, preservando as mesmas propriedades, ou sem perderem significativamente as propriedades fundamentais quando sujeitos a vários ciclos de reaquecimento e fusão, permitindo assim a sua fácil enformação e a sua reciclagem. De um modo geral, apresentam um baixo custo de produção e relativa facilidade de processamento, exibindo boas propriedades para um elevado número de aplicações, o que os torna num material de evidente importância, representando uma parte significativa dos materiais poliméricos em uso. Distinguem-se termoplásticos de uso comum e de uso técnico, as características de cada um baseiam-se essencialmente nas aplicações, processos de fabrico e

principalmente no seu desempenho. Alguns exemplos de termoplásticos de uso comum são: PP, PE, PS e PVC, entre muitos outros. Por outro lado, um exemplo de termoplásticos técnicos, também designados de termoplásticos de engenharia, dado o seu elevado desempenho, são as poliamidas, como por exemplo a Poliamida 66 (PA66), também conhecida por Nylon 66. Caracterizada pela sua elevada resistência mecânica e química, excepcional rigidez, resistência à abrasão, à fadiga e à temperatura, sendo usado frequentemente em engrenagens, cabos, fios e fibras.

Outros termoplásticos, como o PLA, assumem aplicações de uso comum mas também técnicas, e são atualmente bastante relevantes, dadas as suas vantagens ambientais e a sua biocompatibilidade. Este polímero será abordado com maior detalhe ao longo do presente capítulo [21], [33], [35].

Por sua vez, os **termoendurecíveis**, são obtidos através de uma mistura de dois componentes, uma resina e um endurecedor, que reagem entre si solidificando, processo designado como cura química. Apresentam uma estrutura mais rígida e propriedades mecânicas distintas. Contudo, apesar de possuírem uma maior resistência ao calor, são infusíveis, e a exposição ao calor resulta na sua deterioração, tornando a sua reciclagem impraticável. Além disso possuem ligações intermoleculares bastante fortes, o que os torna tipicamente mais resistentes. Os mais genéricos são as resinas epóxicas (epóxis) e os poliésteres. Ambos são amplamente utilizados como matriz de polímeros reforçados com fibra sintéticas [33].

Os **elastómeros** apresentam características comuns aos termoplásticos e aos termoendurecíveis, são extremamente flexíveis e deformam-se com bastante facilidade de forma reversível. Não apresentam, assim, a rigidez típica dos termoendurecíveis, contudo, e tal com os termoendurecíveis, a temperatura origina a sua decomposição, o que impossibilita a sua reciclagem [33].

## **Biopolímeros e o PLA**

A biomassa é uma importante fonte de produção de materiais poliméricos, sendo os biopolímeros os compostos orgânicos mais abundantes na biosfera. São produzidos através de plantas, animais, bactérias e fungos, podendo ser derivados de polissacarídeos, proteínas, lípidos, entre outras substâncias.

As vantagens recorrentes do uso de biopolímeros são diversas, representam uma carga ambiental mais reduzida, são biodegradáveis e até mesmo biocompatíveis. Porém, o que se observa como uma vantagem pode ser também uma desvantagem, pois o facto de serem biodegradáveis pode condicionar o seu uso a ambientes controlados para prevenir a sua degradação prematura.

Biopolímeros com importância industrial, são por exemplo o PLA, os polihidroxialcanoatos (PHA), e o amido termoplástico (TPS). A presente abordagem, incidirá exclusivamente no PLA [2], [4], [37].

O **ácido poliláctico** é um poliéster termoplástico e, como biopolímero, é produzido de forma artificial a partir da fermentação de açúcares de derivados de recursos renováveis como por exemplo milho, beterraba, cana de açúcar, trigo, tapioca e celulose. A polimerização do PLA pode dar-se por condensação a partir do ácido láctico que deriva da fermentação das matérias atrás mencionadas. Contudo, uma outra variante de polimerização de abertura de anel é utilizada para obter pesos moleculares mais elevados. A estrutura química do PLA pode ser observada na Figura 2.5.

O processamento do PLA é semelhante a qualquer termoplástico em geral, podendo ser moldado por injeção e por variados processos de termoformação. No entanto, no estado fundido é sensível à hidrólise na presença de água. Esta sensibilidade à combinação de humidade e temperatura, torna a secagem do polímero recomendada antes do seu processamento. As vantagens do PLA incluem não só as suas boas propriedades mecânicas, tais como boa resistência mecânica e módulo de elasticidade mas também a particularidade de ser biocompatível, biodegradável (sob condições controladas) e renovável. As suas maiores desvantagens estão relacionadas com a durabilidade. Por um lado, a baixa resistência ao calor, que pode resultar na sua fácil deformação, por outro lado a tendência a degradar-se pela hidrólise sob condições de humidade elevada. O PLA é usado há mais tempo na medicina, dada a sua biocompatibilidade. Mais recentemente tornou-se comercialmente relevante, pelo que é usado em diversas aplicações, como embalagens descartáveis de uso alimentar, fibras para sacos de chá e também em produtos de aplicações duráveis como roupas e tampas de telemóveis. É um dos biopolímeros usado com maior frequência como matriz em biocompósitos, dadas as suas propriedades serem comparáveis, a uma temperatura ambiente, com as do PS, PET e PP, podendo substituir estes polímeros sintéticos nalgumas aplicações [4], [37].

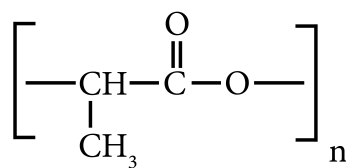


Figura 2.5: Estrutura do PLA [37].

Quando comparado com o PP, o PLA apresenta-se como um material mais duro e rígido face ao PP que é mais flexível. A Tabela 2.2 indica algumas propriedades físicas e mecânicas de ambos os materiais para comparação onde se observa desde logo que o PP possui uma densidade e rigidez mais baixa face ao PLA e valores de deformação bastante superiores. Apesar da grande variabilidade dos valores da resistência à tração ambos os materiais podem ser comparáveis, ainda que o PP apresente resultados inferiores dentro do intervalo de variação.

Tabela 2.2: Propriedades físicas e mecânicas típicas do PP comparativamente com PLA [21],[33],[38].

Propriedades	PLA	PP
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,24 – 1,26	0,90 – 1,06
Resistência à Tração (MPa)	47,78 – 68,9	31 – 70
Módulo Elasticidade E (GPa)	2,02 – 3,54	1,14 – 1,7
Deformação (%)	1 – 12	100 – 600

### 2.2.2. Reforços de fibras artificiais, fibras sintéticas e fibras naturais de origem vegetal

As fibras formam os compósitos com maior importância do ponto de vista tecnológico visto apresentarem vantagens muito significativas como material de reforço. Possuem uma elevada resistência à tração, proporcionando o uso de alguns materiais na fase da matriz que, em muitos contextos, seriam bastante inadequados isoladamente. Como exemplo, os cerâmicos caracterizam-se por serem materiais duros, e como é característico dos materiais duros, são frágeis e quebradiços. Uma das principais funções das fibras é, justamente, prevenir a propagação de fendas, evitando a ocorrência de uma falha súbita, mas sim progressiva, contendo e antecipando falhas catastróficas. Permitem, deste modo, explorar a dureza e resistência de alguns materiais frágeis sem um risco tão elevado.

Todavia, as propriedades das fibras, não são as únicas a ditar as características físicas e mecânicas de um compósito. Há que considerar a influência do comprimento das fibras e também da orientação e da concentração das mesmas no compósito. No primeiro caso, há uma relação direta entre o comprimento da fibra e a eficácia da transmissão da carga aplicada sobre matriz à fibra. No segundo caso, a direção da distribuição das fibras e a sua concentração influenciam significativamente o desempenho mecânico do compósito, sendo um importante fator a considerar no seu desenvolvimento, ficando esta escolha dependente não só da natureza dos esforços a que o material será sujeito mas também do custo [21], [33].

Originam, assim, materiais com elevado desempenho, que combinam ótimas propriedades, como densidades relativamente baixas, elevada resistência à fratura e à deformação. Dependendo de cada combinação, podem ser acrescidos de uma boa resistência ao atrito, boa estabilidade térmica, boa resistência à corrosão, elevada resistência química a solventes, e até mesmo a reciclabilidade e biodegradabilidade em alguns casos, entre muitas outras características [33].

As fibras, em geral, distinguem-se conforme a sua origem e modo como são obtidas. Classificam-se como fibras artificiais, fibras sintéticas, fibras naturais e, adicionalmente, podem categorizar-se ainda as fibras biosintéticas. As fibras artificiais, sintéticas e naturais serão discutidas mais à frente neste mesmo capítulo. Relativamente às biosintéticas, são fibras que derivam de materiais de origem natural que, por vezes, são obtidas através de uma série de processos que mimetizam processos naturais que ocorrem de forma isolada na natureza, como por exemplo alguns biopolímeros [4], [37], [39].

## Fibras artificiais e sintéticas

Fibras artificiais são fibras obtidas a partir de materiais naturais, na sua maioria à base de celulose, não ocorrendo integralmente na natureza. São portanto materiais submetidos a reagentes e solventes químicos e regenerados ou formados por processos de extrusão.

As fibras sintéticas são obtidas pela síntese química artificial, a um nível molecular, de substâncias geralmente derivadas de petróleo, mas não só. Podem ser de origem orgânica como as fibras de poliéster, poliamida, polietileno, entre outras. Mas também de origem inorgânica como as fibras metálicas.

Alguns exemplos de fibras mais frequentemente utilizadas como reforço de compósitos de matriz polimérica são as fibras de vidro, as fibras de carbono e também as fibras de aramida. As fibras de vidro possuem propriedades mecânicas comparáveis a algumas das fibras naturais, ao contrário das fibras de carbono e aramida que são materiais de elevado desempenho com características excepcionais [21], [39].

**As fibras de vidro**, são um material fibroso baseado essencialmente em materiais inorgânicos como minerais sintéticos. A sua composição química mais comum consiste em:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  e outros, por ordem proporcional. A substância primária é portanto a sílica (dióxido de silício -  $\text{SiO}_2$ ) material que ocorre na natureza, possuindo também pequenas quantidades de outras substâncias que servem como modificadores e estabilizadores à ocorrência das permutações. A variação do tipo e quantidade destas substância permite alterar as propriedades físicas das fibras de vidro [21], [39].

As fibras de vidro constituem o material mais usado como reforço em compósitos de matriz polimérica. Este tipo de compósitos possui uma vasta gama de aplicações. Segundo Callister (2007), o amplo uso deste material deve-se ao facto de estar bastante disponível, ser económico e de fácil transformação, proporcionando uma grande autonomia em termos de técnicas de fabrico e liberdade de projeto. Além disso possui propriedades mecânicas bastante satisfatórias, boa resistência específica e uma excelente resistência química [21], [39].

O processo de fabrico destas fibras é variado uma vez que podem obter diversas formas. Geralmente são produzidas por mistura e fusão das matérias-primas a alta temperatura, na ordem dos  $1200^\circ\text{C}$ , e em seguida são processadas por vários métodos que dependem da finalidade. Na fabricação de fibras têxteis utiliza-se um processo de fiação contínua por estiramento do filamento através de uma fieira, recorrendo a técnicas de extrusão ou pultrusão. Os filamentos resultantes são arrefecidos e posteriormente a sua superfície pode ser tratada com revestimentos. Outros métodos são usados na produção de fibras com fins especiais. As fibras de vidro são disponibilizadas sob diversas formas, como fibras curtas ou longas, em lâ, em fio ou em tecidos com diversos tipo de configurações de malha e adequadas a uma vasta gama de aplicações [21], [39].

Outras fibras sintéticas tais como as **fibras de carbono** e as **fibras de aramida** (conhecidas pela sua denominação comercial *Kevlar*), detêm uma enorme importância como materiais de elevado

desempenho. Possuem excelentes características físicas e mecânicas e apresentam uma excelente resistência a altas temperaturas preservando as suas propriedades e, quimicamente a uma temperatura ambiente são inertes a inúmeras substâncias. Porém os impactos ambientais associados ao seu complexo método de produção são significativos. [21], [39].

## Fibras naturais de origem vegetal

A variedade de fibras naturais é vasta e podem ser classificadas e agrupadas conforme a sua origem. De uma maneira geral, as fibras naturais são classificadas pela sua origem, a saber, vegetal, animal ou mineral. As fibras vegetais são provenientes de plantas, baseadas essencialmente em celulose, as fibras animais em proteínas e as minerais em silicatos. A Figura 2.6 dá-nos uma visão geral da ampla variedade de fibras naturais, assim como alguns exemplos. A maioria destas fibras são bem conhecidas e muitas delas são usadas pela humanidade há milénios. [2], [4].

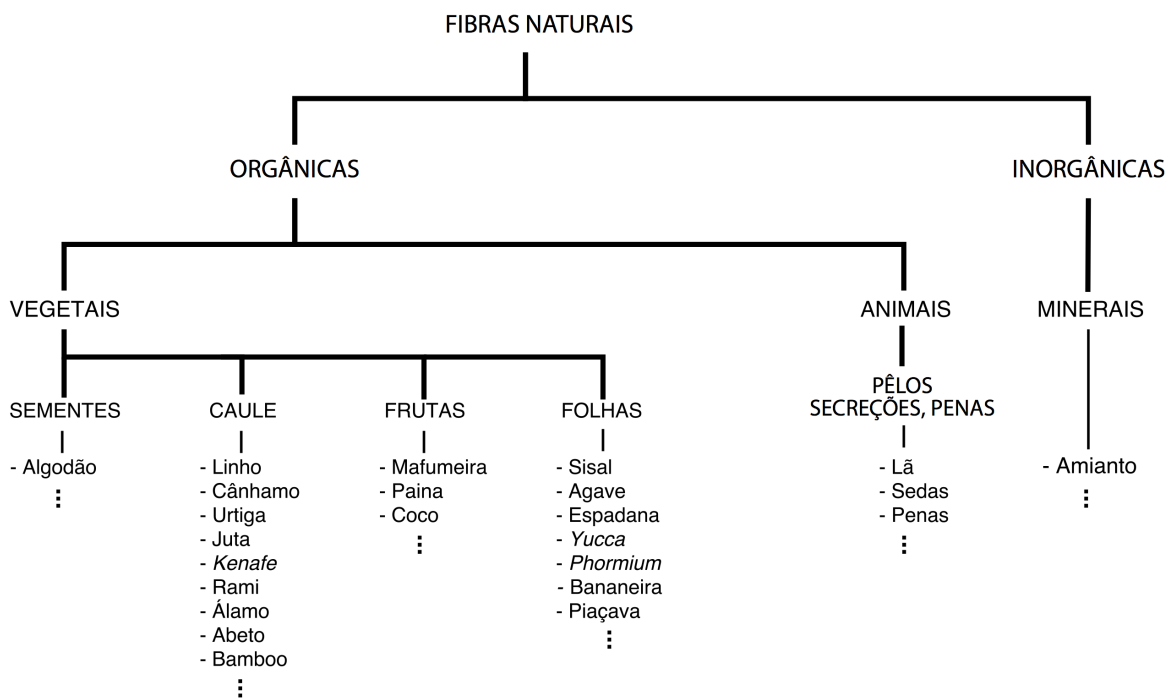


Figura 2.6: Classificação das fibras naturais (adaptado de [4]).

As **principais vantagens das fibras naturais** são variadas, regra geral, as fibras naturais são bem adequadas como material de reforço para compósitos de matriz polimérica, especialmente de matriz termoplástica, dada a sua baixa densidade, elevadas resistência e rigidez específicas. Apresentam vantagens em termos de propriedades físicas, mecânicas, ambientais, de processamento e ainda sociais e económicas, tais como:

- Baixa densidade e baixo peso específico;
- Boas propriedades de isolamento térmico e acústico;

- Propriedades específicas elevadas, rigidez elevada e boa resistência à tração;
- Captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> por fotossíntese;
- Recurso renovável;
- Biodegradáveis ou compostáveis;
- Possível reciclagem térmica com recuperação de energia, e sem resíduos quando incineradas;
- Produção exige um baixo consumo de energia;
- Processamento amigável (sem riscos para a saúde se inaladas e sem irritações para a pele);
- Material não abrasivo (sem desgaste de ferramentas e moldes);
- Baixo custo de investimento, passível de produzir em países com baixos níveis de rendimento;
- Baixo custo do produto final e alargada gama de aplicações.

As **principais desvantagens** das fibras naturais quando usadas como material de reforço em compósitos, centram-se na questão da adesão interfacial entre a matriz e as fibras, provocada pela deficiente compatibilidade entre as mesmas, derivada principalmente das imperfeições e defeitos superficiais deste tipo de fibras, assim como da relativa alta absorção de humidade. Estas fibras requerem muitas vezes modificações e tratamentos para melhoramento da superfície e consequentemente da sua aderência à matriz [2].

As desvantagens prendem-se essencialmente com as características das propriedades físicas, mecânicas e químicas, e outras, como por exemplo:

- Propriedades anisotrópicas;
- Resistências mais baixas em geral (em particular a resistência ao impacto);
- Baixa resistência à flexão e à compressão;
- Baixa resistência ao fogo e baixa resistência térmica;
- Restrições na temperatura de processamento;
- Alta absorção de humidade (provoca inchaço das fibras e a instabilidade dimensional);
- Baixa durabilidade e resistência microbiana (com tratamentos pode melhorar consideravelmente);
- Fibras descontínuas;
- Qualidade variável, dependendo do local, sazonalidade (influências imprevisíveis, como o clima);
- Dependente de ciclos oferta e procura.

## **Comparação das fibras naturais vegetais e fibras de vidro**

Uma síntese comparativa entre as vantagens e as desvantagens das fibras naturais e das fibras de vidro é relevante, porque na presente dissertação é realizada uma avaliação comparativa do ciclo de vida envolvendo ambos os materiais. Na Tabela 2.3 é possível observar algumas propriedades físicas e mecânicas de variadas fibras naturais e fibras de vidro, para comparação. A Tabela 2.4 faz uma síntese comparativa entre as fibras naturais vegetais e as fibras de vidro, sem focar nos aspetos de desempenho mecânico já abordados na tabela anterior.

Observa-se desde logo que as fibras naturais possuem densidades assinaladamente mais baixas relativamente às fibras de vidro. As fibras naturais apresentam uma grande variabilidade a nível do módulo de elasticidade e a sua resistência à tração é claramente inferior às fibras de vidro. Ainda assim, as fibras naturais possuem boas propriedades, principalmente no caso das fibras de linho e de rami. Para além disso, as propriedades específicas são equiparáveis e em alguns casos superiores, veja-se por exemplo o módulo de elasticidade específico em que apenas as fibras de sisal possuem um valor inferior às fibras de vidro e, no caso da resistência específica à tração, os valores para as fibras de linho são equiparáveis aos das fibras de vidro. Do mesmo modo, algumas fibras naturais, quando combinadas com matrizes poliméricas, resultam em compósitos com propriedades específicas em alguns casos superiores às dos Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV). Não obstante, na maioria dos casos, a resistência dos compósitos reforçados com fibras naturais é mais baixa que a dos compósitos reforçados com fibra de vidro [3], [23], [40].

*Tabela 2.3: Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras naturais e fibras de vidro[3],[23].*

<b>Propriedades</b>	<b>Vidro</b>	<b>Linho</b>	<b>Cânhamo</b>	<b>Juta</b>	<b>Rami</b>	<b>Sisal</b>
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2.5–2.59	1.4–1.5	1.4–1.5	1.3–1.49	1.0–1.55	1.33- 1.5
Resistência à Tração (MPa)	2000-3500	343-2000	270–900	320–800	400–1000	363–700
Módulo Elasticidade <b>E</b> (GPa)	70–76	27.6-103	23.5-90	8–78	24.5-128	9.0–38
Módulo específico (E/ρ)	29	45	40	30	60	17
Resistência específica à Tração (σ/ρ)	0.5–1	0.4–1.1	--	0.31–0.38	--	0.40-0.42
Deformação (%)	1.8–4.8	1.2–3.3	1–3.5	1–1.8	1.2–4.0	2.0–7.0
Teor de Humidade (%)	--	8–12	6.2–12	12.5-13.7	7.5–17	10–22

*Tabela 2.4: Comparação entre fibras naturais vegetais e fibras de vidro (Adaptado de [40]).*

	<b>Fibras Naturais</b>	<b>Fibras de vidro</b>
Densidade	Baixa	Dobro
Custo	Baixo	Baixo (mas superior)
Renovabilidade	Sim	Não
Reciclabilidade	Sim	Reutilizável (+/-)
Consumo energético	Baixo	Alto
Distribuição	Ampla	Ampla
CO <sub>2</sub> Neutro	Sim	Não
Abrasividade para as máquinas	Não	Sim
Risco para a saúde se inalado e irritações na pele	Não	Sim
Absorção de humidade	Sim	Não
Disposição final	Biodegradável	Não-biodegradável

Concluindo, por um lado, apesar de algumas propriedades específicas das fibras naturais apresentarem resultados superiores, as fibras de vidro apresentam melhores propriedades físicas e mecânicas gerais. Além disto as propriedades químicas das fibras de vidro são significativamente

superiores. Por outro lado, do ponto de vista ambiental e ecológico, as fibras naturais apresentam vantagens notáveis, oferecendo um balanço neutro ou até mesmo negativo de emissões de CO<sub>2</sub>, como resultado da fotossíntese. Do mesmo modo, são biodegradáveis, compostáveis e passíveis de reciclagem térmica com recuperação de energia. Isto sugere que as fibras naturais vegetais possam substituir as fibras de vidro em algumas aplicações que não exijam elevado desempenho mecânico, podendo acrescentar benefícios de ordem ecológica, e não só.

### 2.2.3. Fibras de linho

As fibras de linho pertencem ao domínio das fibras naturais de celulose (polímero natural) e integram o grupo de fibras do caule. Estas fibras são obtidas a partir da haste do linho (*Linum usitatissimum L.*), uma planta herbácea pertencente à família das lináceas, uma das mais antigas plantas para extração de fibras cultivadas pelo homem [4].

Atualmente são produzidas três variedades desta planta, designadamente, o linho para obtenção de fibras, o linho para obtenção de sementes (oleaginosas) e ainda o linho de cruzamento. A distinção da variedade de linho para fibras é essencialmente o maior comprimento da haste, sendo mais adequado à extração de fibras. O tipo oleaginoso, por sua vez, é mais curto, com muitas ramificações que afetam a qualidade das fibras, mas oferece um rendimento de sementes muito superior. Para além da extração de sementes ricas em ácidos gordos essenciais como o Omega 3, é também considerado relevante para a alimentação animal, uma vez que os coprodutos provenientes da produção de óleo de linhaça são utilizados como matérias-primas para alimentação animal. Por fim, o linho de cruzamento considera-se uma variedade de dupla finalidade, sendo intermediário na produção de ambos os produtos, fibras e sementes [4], [41].

O linho é composto por fibras celulósicas (polímero celulósico), que percorrem todo o comprimento do caule da planta, que se caracteriza por ser um caule aéreo do tipo haste. A anatomia do caule do linho é possível observar nas Figuras 2.7 e 2.8. As fibras encontram-se na parte interna da epiderme, no interior do floema, sendo responsáveis por suportar as células internas do floema. O floema é uma estrutura vascular que transporta nutrientes, sendo o outro o xilema (núcleo lenhoso). As fibras proporcionam ainda a resistência à tração e flexibilidade necessária à haste da planta. Essa flexibilidade é resultante dos nódulos (pontos fracos) distribuídos de forma aleatória ao longo do comprimento da fibra [4].

A Figura 2.8 mostra, com maior pormenor, a extremidade de uma haste de linho macerado, já decomposto do floema, onde é possível observar filamentos de fibras unidos em vários feixes. Os caules do linho contêm entre 15 a 40 feixes, e cada um dos feixes contém até cerca de 40 filamentos de fibras (fibras elementares).

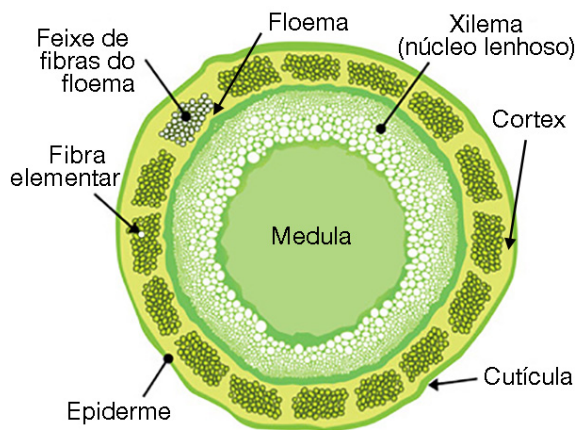


Figura 2.7: Representação da secção transversal da haste linho (Adaptado de [42]).

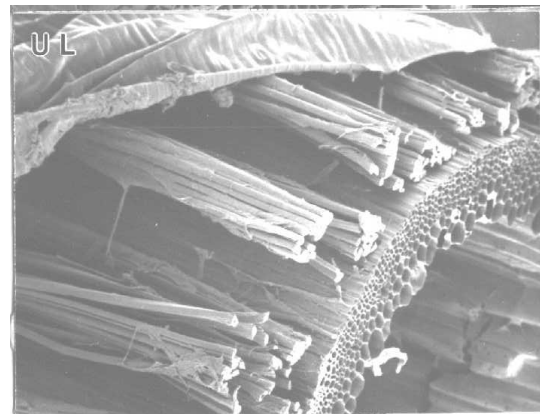


Figura 2.8: Imagem microscópica da extremidade de uma haste de linho macerado [43].

As fibras de linho podem atingir 90cm de comprimento e uma espessura média entre 12 a 16  $\mu\text{m}$  de diâmetro. São conhecidas pela sua resistência e flexibilidade, finura e suavidade, e distinguem-se de fibras mais duras como é o exemplo das que são extraídas das folhas. São assim uma das fibras naturais mais fortes e com melhores propriedades mecânicas, possuindo uma elevada rigidez e resistência à tração, e tal como todas as fibras naturais de origem vegetal, uma baixa densidade (ver Tabela 2.4) [4].

### Cultivo do linho

O linho é cultivado em regiões temperadas. Todavia desenvolve-se e floresce melhor em ambientes mais frescos e húmidos com temperaturas moderadas, sendo a Europa um dos maiores produtores a nível global.

O linho é uma planta de cultivo anual, cujo ciclo que vai da sementeira até à colheita, tem a duração de cerca de 100 dias, crescendo até cerca de um metro antes do arrancamento. Em condições climatéricas normais não requer uma irrigação intensa, sendo usadas pequenas quantidades de fertilizantes, pesticidas e outros químicos (apesar de nas mesmas condições, poder alcançar um bom desenvolvimento, mesmo sem recurso ao uso de químicos, ou com recurso a fertilizantes orgânicos).

Numa análise de ciclo de vida é fundamental considerar-se os componentes usados numa plantação representativa. Por conseguinte, os fertilizantes mais usados em plantações de linho são: Óxido de potássio,  $\text{K}_2\text{O}$  (K), Nitrato de Amónio ou Nitrogénio/Azoto (N) e Superfosfato Triplo,  $\text{P}_2\text{O}_3$  (P).

A quantidade de fertilizantes usada varia em conformidade com o local e método de cultivo. Como exemplo, as quantidades recomendadas para um plantação no Reino Unido é da ordem dos 40 kg/ha (N), 50 kg/ha (P) e 50 kg/ha (K), e na Irlanda as quantidades recomendadas para o mesmo tipo de plantação são da ordem dos 20 kg/ha (N), 20 kg/ha (P) e 80 kg/ha (K). É de

salientar ainda que os adubos sintéticos representam o maior gasto energético nos produtos agrícolas em produções modernas, representando entre 40% a 68% do uso de energia.

Elementos secundários são também recomendados aos produtores, nomeadamente o Calcário Agrícola,  $\text{CaCO}_3$  (E), para correção de acidez do solo (pH). Além de muitos outros como por exemplo, magnésio e enxofre, ferro e zinco.

Outros produtos químicos como pesticidas, apesar de usados em pequenas quantidades, representam a maior proporção de elementos agrotóxicos, sendo que a restante parte é representada principalmente por herbicidas, inseticidas e fungicidas [44], [45].

## Preparação e processamento das fibras

As fases envolvidas no processamento industrial das fibras de linho são análogas às fases a que as produções artesanais ou semi-industriais obedecem. No entanto, a tecnologia envolvida é mais complexa e bastante mais eficiente.

Após a planta atingir o tamanho e maturação pretendidos é arrancada (ver Figura 2.9) e ripada para separar as sementes. De seguida efetua-se a separação e extração das fibras das restantes partes que compõem o caule. A operação compreende uma série de processos denominados por: Maceração, Trituração, Espadelação, Assedagem e Fiação. Por fim, dependendo da aplicação, poderá ainda proceder-se a tratamentos e branqueamento e posteriormente à tecelagem de diversos tipos de tecidos.



Figura 2.9: Colheita do linho por arrancamento [46].



Figura 2.10: Maceração por orvalho [46].

A **maceração também conhecida como curtimenta**, consiste em separar as fibras do córtex e das estruturas vasculares do caule (o floema e o xilema). Esta separação é conseguida por decomposição (fermentação bacteriana), tratando-se de um processo que pode ser executado por uma variedade de métodos e que tipicamente envolvem uma exposição por vários dias da haste da planta à humidade. Os vários métodos de maceração existentes são: maceração com água (quente ou fria), maceração por orvalho, maceração em tanque e maceração química.

**Maceração com água** produz fibras de alta qualidade, sendo assim a mais utilizada. Consiste em mergulhar o linho em águas paradas ou correntes, como pântanos, lagos ou ribeiras, decorrendo mais aceleradamente em fontes de água parada, devido à abundância da fauna bacteriana.

**Maceração por orvalho** (ver Figura 2.10) é bastante útil em áreas de acesso limitado a fontes de água. Consiste em distribuir as hastes do linho arrancado ao longo do campo de cultivo e aguardar que o orvalho noturno e as temperaturas quentes diurnas provoquem a fermentação. Este método produz fibras de pior qualidade do que o método de maceração com água e é um processo muito demorado, que pode durar entre 2 a 3 semanas.

**Maceração em tanque** (é uma variação da maceração em água) é realizada em tanques de cimento onde as hastes são colocadas após serem limpas e lixiviadas para remover a sujidade. São colocadas a macerar habitualmente em água quente, cujo processo dura uma média de 4 a 5 dias.

**Maceração química** é um processo idêntico ao anterior, que envolve a adição de químicos que ajudam a acelerar o processo. Contudo, além de ser prejudicial para o ambiente também produz fibras de pior qualidade.

Uma vez macerado, a haste do linho é recolhida e seca. As fases seguintes consistem em quebrar e remover a parte lenhosa e a casca da haste por **trituração**. No seguimento procede-se à **espadelagem** que visa remover os restantes elementos não fibrosos (parte da casca e parte lenhosa).

Por fim procede-se à **assedagem**, que envolve alinhar e separar as fibras de acordo com o seu comprimento. Separam-se as fibras mais finas e longas das fibras mais curtas e grossas (estopa), e removem-se ainda os restantes resíduos.

O produto resultante deste processo são fibras longas na forma de uma mecha de fibras de linho ou, por outras palavras, um feixe de filamentos de linho processado e homogeneizado, num conjunto contínuo com um aspeto macio e brilhante, tal como pode ser observado nas Figuras 2.11 e 2.12. Como coproduto, são geradas as fibras mais curtas e grossas (estopa), muitas vezes usadas como enchimento em compósitos de matriz termoplástica.

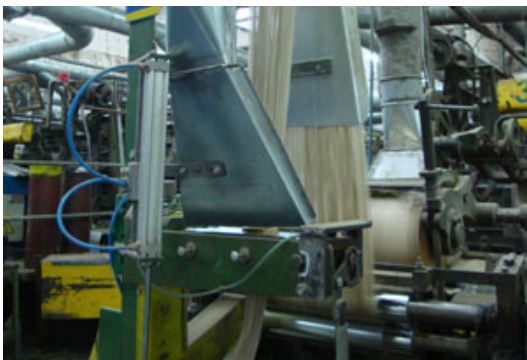


Figura 2.11: Assedagem de fibras de linho em contexto industrial [46].



Figura 2.12: Feixe de filamentos de linho processado e homogeneizado [47].

Após se obter o linho em feixes, procede-se à **fiação**, que consiste em juntar e torcer filamentos de fibras, dando origem a um fio contínuo de fibras de linho. O fio é enrolado e disponibilizado em bobines de diversas dimensões. Posteriormente pode ainda ser realizado um branqueamento. Dependendo da aplicação, os fios de linho ainda podem dar origem a diversos tecidos, através do processo de **tecelagem**.

As fibras de linho são uma das fibras mais amplamente utilizadas como fibras têxteis. Parte desses têxteis são atualmente utilizados na criação de tecidos que formam o reforço de compósitos e biocompósitos. Os coprodutos gerados são usados igualmente em reforço de compósitos com diversos fins, sendo as sementes utilizadas na produção de óleo de linhaça, de linóleo e como aglutinante na produção de tintas. As partículas geradas, fragmentos lenhosos e cascas, são usadas em compostos orgânicos, manta para jardinagem e agrícola, e ainda como forragem animal, entre muitas outras aplicações [4].

#### 2.2.4. Aplicações

Os materiais compósitos reforçados com fibras têm aplicações diversas, integrados num vasto número de produtos usados no nosso quotidiano. Os compósitos reforçados com fibras de vidro são usados em aeronaves militares desde 1940, e posteriormente as fibras sintéticas de aramida (kevlar) foram introduzidas no mesmo contexto. Desde a invenção das fibras de carbono de elevada resistência, com fins comerciais em 1964, este tipo de compósitos começou efetivamente a obter um uso mais alargado e, após o aperfeiçoamento das fibras e dos materiais usados como matriz, o seu uso tornou-se efetivo substituindo outros materiais convencionais, como por exemplo as ligas de alumínio e titânio, em componentes com fins estruturais. A indústria aeronáutica e aeroespacial passou a usar este tipo de materiais de forma permanente em aeronaves civis e militares, em satélites, estações espaciais, sondas espaciais e em veículos espaciais.

As fibras sintéticas possuem, hoje em dia, uma vasta gama de aplicações, destacando-se as que exigem materiais de elevado desempenho, satisfazendo sobretudo as aplicações onde é exigido baixo peso e elevado desempenho mecânico [48], [49].

Apesar do constante uso pelo homem ao longo da história, os **compósitos reforçados com fibras naturais e os biocompósitos** revelam uma recente importância a nível industrial, assumindo-se como uma solução viável em algumas aplicações e, conseqüentemente, são cada vez mais procurados. Dado o aumento da investigação, a partir da década de 1980, surgiu novamente o interesse por estes materiais. Esse interesse reforçou-se pelo desenvolvimento de novas técnicas, melhoria dos materiais, redução dos custos e também pela crescente motivação gerada por questões ambientais e ecológicas, reforçadas mais recentemente por leis que impõem cotas específicas para o uso de materiais renováveis e recicláveis, principalmente na indústria automóvel e na construção civil.

O uso de materiais compósitos baseados em plásticos e fibras naturais são uma das soluções encontradas pelos fabricantes automóveis na Europa, para responder às exigências regulamentadas. Segundo a diretiva europeia 2000/53/EC, em 2015 os meios de transporte motorizados terão de cumprir uma série de normas como, a reciclagem de 85% do peso total dos componentes automóveis em fim de vida e a recuperação deverá ser da ordem dos 95%. Os novos veículos devem ser compostos de 95% de materiais recicláveis, em que 85% devem ser reutilizados ou reciclados e os restantes 10% passíveis de recuperação de energia [34].

Fabricantes de automóveis como a Daimler Chrysler, Mercedes-Benz, Volkswagen, Audi, BMW, Ford e Opel, fazem uso das vantagens destes materiais utilizando várias tecnologias como moldação por compressão de baixa pressão, para produzir peças e componentes que podem ser simultaneamente revestidos com outros materiais, como componentes interiores não estruturais ou semi-estruturais que podem reduzir o peso dos componentes e por conseguinte do veículo. A título de exemplo, como se pode constatar a partir da Figura 2.14, o Mercedes Classe S possui um total de 27 componentes, que representam um peso total de 43 kg, que são fabricados com materiais naturais renováveis como fibras de linho e fibras de madeira. Estes incluem, guarnições do porta-bagagens, secções dos painéis internos das portas, encosto do banco do condutor, entre outros componentes [50].

No sector dos veículos motorizados existe já uma grande variedade de produtos fabricados com recurso a biocompósitos, a *scooter* da empresa Van.Eko (ver Figura 2.15) poderá vir a representar um desses exemplos na indústria europeia, acrescentando-se a outros bons exemplos de desenvolvimento de aplicações de alto valor para os compósitos reforçados com fibras naturais [4], [51].

A construção civil, a par da indústria automóvel, representa também uma importante área de aplicação. É comum o uso destes materiais em soalhos, estrados, reforços estruturais, enchimentos e isolamentos. Na figura 2.13, é possível observar uma peça de soalho em compósito reforçado com partículas e fibras curtas de linho numa matriz termoplástica de PP, fabricado por extrusão. É também comum surgirem projetos com aplicações experimentais, como são exemplo na Figura 2.17 e 2.18, os painéis da fachada de uma estação recetora de gás, produzidos com um compósito de bioresinas reforçado com fibras de cânhamo.

É cada vez mais fácil encontrar produtos de consumo que utilizam compósitos reforçados com fibras naturais e biocompósitos. Além das principais aplicações, estes materiais também satisfazem um certo número de aplicações de nicho como artigos de escritório, mobiliário e artigos de casa, caixas e recipientes, produtos desportivos e de lazer diversos. É ainda de salientar que muitos fabricantes de instrumentos musicais produzem hoje instrumentos com boas propriedades acústicas a partir de compósitos com reforços naturais, como guitarras produzidas a partir de compósitos reforçados com fibras de linho e uma resina epóxida biobaseada (ver Figura 2.16) [52].



Fig. 2.13: Soalho extrudido em compósito [53].



Fig. 2.14: Mercedes Classe S, possui 27 componentes fabricados em materiais naturais renováveis [50].



*Fig. 2.15: Scooter com cobertura externa e outros componentes produzidos em biocompósito [51].*



*Fig. 2.16: Guitarra produzida com compósito reforçado com fibras de linho e resina epóxida biobaseada [52].*



*Fig. 2.17: Cobertura de fachada produzida num compósito de bioresina reforçado com fibras de cânhamo [54].*



*Fig. 2.18: Pormenor do fabrico dos painéis [54].*

### **2.2.5. Processos de fabrico**

Os materiais compósitos podem ser produzidos a partir de diferentes processos de fabrico e pós-processados posteriormente como matéria-prima, facto que lhes confere uma liberdade de projeto assinalável. A escolha dos processos envolvidos depende essencialmente de fatores de ordem económica, tecnológica e de design. A presente abordagem, incidirá no processo de moldação por compressão a quente e no processo de maquinação por controlo numérico computadorizado (CNC).

A **moldação por compressão** é um processo de termoformação adequado a matrizes termoendurecíveis e também termoplásticas e constitui o processo mais comum de fabrico de compósitos reforçados com fibras naturais. Permite o fabrico de peças de complexidade moderada que não podem ser moldadas por injeção, como é o caso de compósitos reforçados com fibras alinhadas, ou que por razões dimensionais e de custo são inviáveis de produzir mediante outros métodos. Como se pode observar na Figura 2.19, a tecnologia usada neste processo consiste habitualmente numa prensa com elementos móveis que possui o molde ou ferramenta acoplado. O procedimento compreende duas fases, no caso de um termoplástico o material é primeiro pré-aquecido para que se torne maleável, e na fase seguinte coloca-se sob o molde e a moldação do

material dá-se após o molde fechar sob a pressão de uma prensa hidráulica. Por outro lado, os materiais termoadescentes são colocados no molde e a sua cura química dá-se por ação do ligeiro aquecimento do molde, simultaneamente o molde é fechado com a pressão adequada para o material consolidar sob a forma desejada.

No caso de compósitos termoplásticos pré-impregnados e dada a sua possibilidade de fusão, estes podem ser moldados diretamente. O procedimento consiste em aquecer o material no molde fechado sob pressão da prensa, até à temperatura de fusão, e posterior arrefecimento do mesmo. De forma mais concisa e sintética, o processo consiste em colocar o material, neste caso o compósito na base do molde ou ferramenta, com cavidades moldadas ou simplesmente plana, e de seguida sujeitar o material ao calor e pressão pré-estabelecidos para forçar o material a encher a cavidade [4], [21].

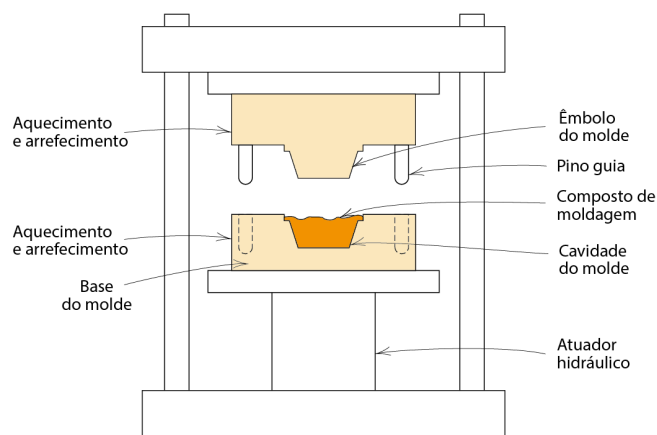


Figura 2.19: Representação esquemática de um aparelho de moldagem por compressão (adaptado de [21]).

Além do processo de formação do compósito, este pode ainda ser pós-processado para dar origem a componentes que não se fabriquem diretamente na fase de moldação, ou para ajustar detalhes das peças produzidas na fase de moldação.

Os materiais compósitos são adequados a alguns processos convencionais de maquinaria mecânica como a fresagem e furação. Os processos de maquinaria são sistemas subtrativos que consistem na remoção de material de uma peça, com o objetivo de lhe conferir uma forma com dimensões pretendidas, mas também para obter acabamentos superficiais desejados. Variam conforme o tipo de material a maquinar, a escala e a complexidade da forma.

A **maquinação CNC** permite obter peças de alta precisão e complexidade com a vantagem de reduzir significativamente o fator de erro humano, possibilitando uma reprodutibilidade em larga escala, mesmo em peças com baixas tolerâncias dimensionais [55].

## 2.2.6. Reciclagem e biodegradabilidade

As preocupações ambientais relacionadas com os efeitos do uso exaustivo de plásticos em embalagens, em objetos descartáveis e outros produtos, estão relacionadas essencialmente com as

consequências da deposição destes em lixeiras onde duram centenas de anos sem se degradar. Além dos impactos ambientais e a consequente depleção de recursos que a extração de matérias-primas para a sua produção representa, as dificuldades inerentes à reciclagem de alguns plásticos são um fator importante a considerar. Alguns plásticos são termoendurecíveis e não podem ser fundidos uma segunda vez, tornando impossível a sua reciclagem na real aceção do termo. Para além disso, existe incompatibilidade na ligação química entre alguns termoplásticos, impossibilitando a sua mistura quando se procede à sua refusão. Com o objetivo de resolver este segundo constrangimento, foi desenvolvida e criada uma norma para identificar os produtos plásticos através de códigos (ver Figura 2.20), que passam a estar integrados em qualquer objeto de consumo, viabilizando a identificação e a separação dos mesmos na reciclagem.



Figura 2.20: Códigos para identificação de plásticos para reciclagem [36].

As siglas associadas aos códigos identificam o tipo de plástico, é de salientar que o que se apresenta identificado com o número 7 (outros), inclui outros plásticos como algumas poliamidas, acrílicos, policarbonato, poliuretanos e bioplásticos, como por exemplo o PLA.

A reciclagem destes plásticos, como por exemplo garrafas e recipientes diversos, pode dar origem a novos produtos recicláveis, desde soalhos para exteriores a carpetes e vestuário. A normalização destes códigos de reciclagem abrange igualmente outros materiais como alguns metais, papéis, tecidos e fibras orgânicas, vidros e também compósitos, porém estes não serão aqui abordados dada a vasta extensão do tema e a pouco relevância para o presente estudo [36], [56], [57].

### Reciclagem de compósitos de matriz polimérica

A reciclagem de compósitos representa um maior desafio de ordem técnica e requer o uso de métodos mais complexos. Podem dividir-se, desde logo conforme a natureza da matriz. Os **termoendurecíveis** constituem a matriz da maioria dos compósitos de alto desempenho, entre eles as resinas epóxicas, poliésteres insaturados e resinas fenólicas. As características químicas destes polímeros, tornam-nos bastante resistentes quimicamente e ao calor e, consequentemente, tornam a sua reciclagem demasiado complexa uma vez que [49]:

- Não podem ser refundidos ou remoldados;
- A maior parte do material em muitos destes compósitos é vidro inorgânico e enchimentos minerais;
- É usada uma vasta gama de enchimentos e reforços;

- Os resíduos destes materiais são suscetíveis de estar contaminados e, muitas vezes, contêm parafusos ou fixações metálicas acopladas.

Como se pode concluir, a reciclagem de termoendurecíveis é extremamente complexa, para além da difícil recuperação das fibras, a matriz não pode ser reciclada na real aceção do termo, sendo por isso preferível designar esta como reutilização ou recuperação. Existem essencialmente quatro tipos de processos passíveis de reutilização de compósitos termoendurecíveis [49]:

- Trituração e reutilização (como material de enchimento para diversos fins);
- Degradação química seletiva;
- Pirólise e reutilização;
- Incineração com consequente recuperação de energia.

Por outro lado, a reciclagem de **compósitos termoplásticos** pode ser efetuada pelos processos já referidos. O facto de a matriz ser possível de refundir torna estes compósitos desde logo recicláveis. A Tabela 2.5. faz a síntese de algumas das principais técnicas usadas na reciclagem de compósitos de matriz polimérica, adicionando as suas características.

Tabela 2.5: Visão geral de tecnologias de reciclagem para diferentes tipos de compósitos (Adaptado de [58]).

Tipos de compósitos	Métodos de reciclagem	Características da tecnologia
Compósitos de Matriz Termoplástica	Refusão e Remodelação	Sem separação da matriz a partir da fibra Retrituração - moldação por injeção / extrusão – moldação por compressão Produto como pellets ou flocos para moldação
Compósitos de Matriz Termoendurecível	Reciclagem Química	Dissolução da matriz <i>(Quebra das fibras – degradação de propriedades)</i>
	Processamento Térmico	Combustão ou incineração para recuperação de energia.
	Reciclagem Mecânica	Fragmentação – Trituração – Moagem (Produtos: Fibras e Enchimentos)
	Reciclagem Térmica	Combustão/Incineração com recuperação de energia Pirólise para recuperação fibras e de matriz
	Reciclagem Química	Dissolução química da matriz (solvente orgânico / hidrólise) <i>(Produto de fibras de alta qualidade, com potencial recuperação da matriz/resina. Inflexibilidade do solvente e potencial poluição).</i>

## Biodegradabilidade

A qualidade de biodegradação está associada à estrutura química de um material, depende das condições ambientais, como temperatura e humidade, e consiste na ocorrência natural da conversão de um material em substâncias, como água, CO<sub>2</sub> e biomassa. A título de exemplo, a biodegradação do PLA é possível em condições controladas, uma vez que é resultante da degradação causada pela hidrólise sob condições de humidade elevada.

A biodegradabilidade não depende da origem ou da base do recurso, do qual o material é obtido. Muitos polímeros termoplásticos são biodegradáveis, independentemente de se tratar de biopolímeros, polímeros sintéticos ou artificiais. A Figura 2.21 permite observar de forma esquemática alguns dos principais polímeros, bem como a relação da sua origem em função da sua biodegradabilidade.

Para concluir, salienta-se ainda que as fibras naturais usadas como reforço de compósitos, como as fibras de linho, são essencialmente baseadas em celulose, um polímero que é intrinsecamente biodegradável [24], [59], [60].

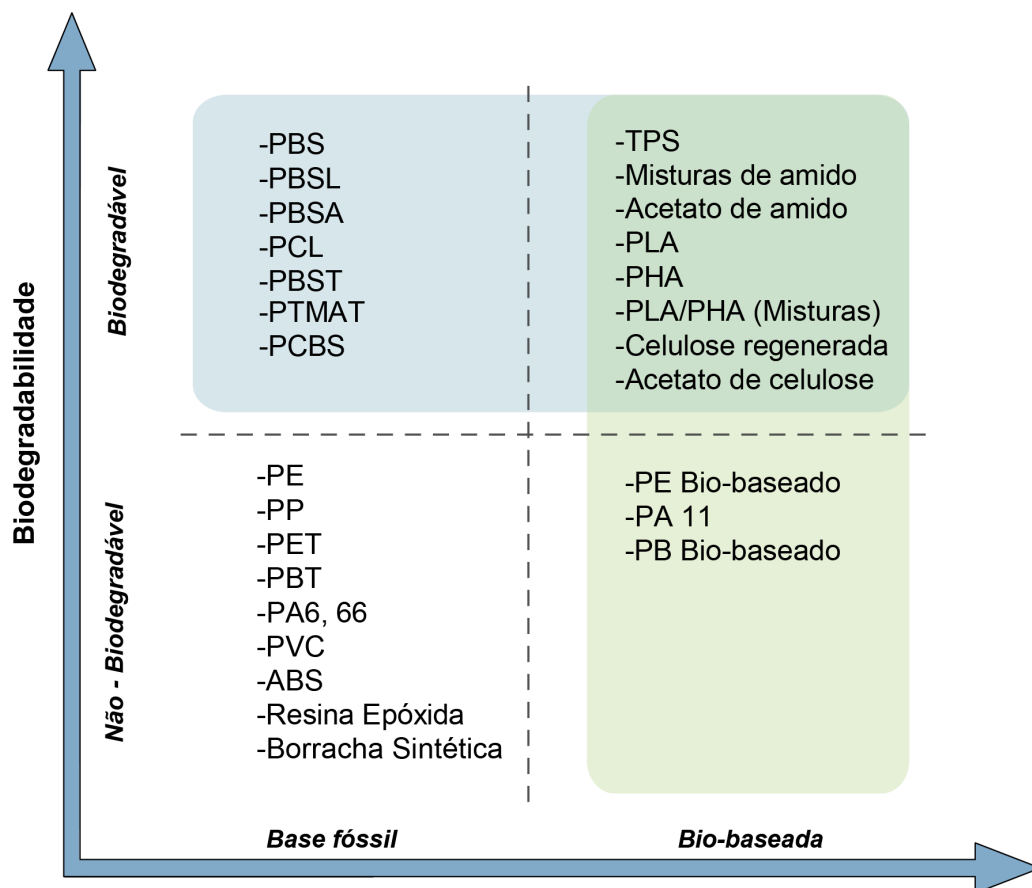


Figura 2.21: Alguns polímeros e a sua biodegradabilidade (adaptado de [60]).

# 3

## Desenvolvimento do Produto

---

O objetivo inicial do presente estudo pretendeu focar-se na avaliação do ciclo de vida de um produto que fosse comercializado e com funções semelhantes ao produto em seguida apresentado, sendo que a escolha do âmbito do projeto foi motivada pelas preocupações ambientais existentes, considerando aspetos relacionados com o desenvolvimento sustentável. Para tal, dever-se-ia comparar os potenciais impactos ambientais dos materiais originalmente aplicados no produto de referência, com o mesmo produto produzido com um material reforçado com fibras naturais. Na tentativa de obter dados reais de um produto comercializado, foram solicitadas informações e a colaboração a diversos fabricantes. Contudo, estas não foram facultadas por motivos relacionados com as políticas das empresas. Por conseguinte, o desenvolvimento do presente produto teve como finalidade identificar possíveis constrangimentos e suportar todo o estudo por forma a alcançar um contexto mais objetivo com dados e considerações mais rigorosas, relativos ao processamento dos materiais e ao fabrico de alguns dos seus componentes com recurso a métodos similares aos que seriam utilizados num contexto real de fabrico.

O presente projeto visou assim o desenvolvimento de um equipamento multifuncional para suporte e estabilização de câmaras de vídeo, que agregue os requisitos de portabilidade, funcionalidade e que suporte o peso de equipamento de gama semiprofissional digital de baixo peso, produzido com um material compósito reforçado com fibras naturais e matriz biodegradável, que incremente vantagens relativamente a um material compósito de PP reforçado com fibras de vidro, do ponto de vista de um desenvolvimento sustentável no seu âmbito geral, visando principalmente os fatores ambientais, mas também os económicos e sociais. Para tal foi estudado e caracterizado o comportamento mecânico de um material compósito de matriz polimérica biodegradável de PLA reforçada por fibras de linho e processado por moldação por compressão, com o fim de entender as suas limitações. A validação dos resultados dos potenciais impactos

ambientais associados foi conferida através de uma avaliação comparativa do ciclo de vida do produto.

### **3.1. Contexto, objetivos e metodologia adotada**

Tal como referido anteriormente, o objetivo deste projeto visa avaliar os potenciais impactos ambientais derivados do fabrico de um produto produzido num biocompósito de matriz polimérica de PLA reforçado com fibras naturais de linho comparativamente com mesmo produto produzido com PP reforçado com fibras de vidro e entender quais as vantagens e desvantagens de cada um dos cenários, considerando hipoteticamente Portugal continental como o local de produção de parte da matéria-prima e de fabrico do compósito e do produto, sendo que o inventário criado na avaliação do ciclo de vida encontra-se naturalmente assente neste princípio. Este estudo poderá ainda funcionar como complemento para outros projetos que visem estudar a sustentabilidade da produção deste tipo de produtos em Portugal, com o fim de entender o potencial de desenvolvimento sustentável associado.

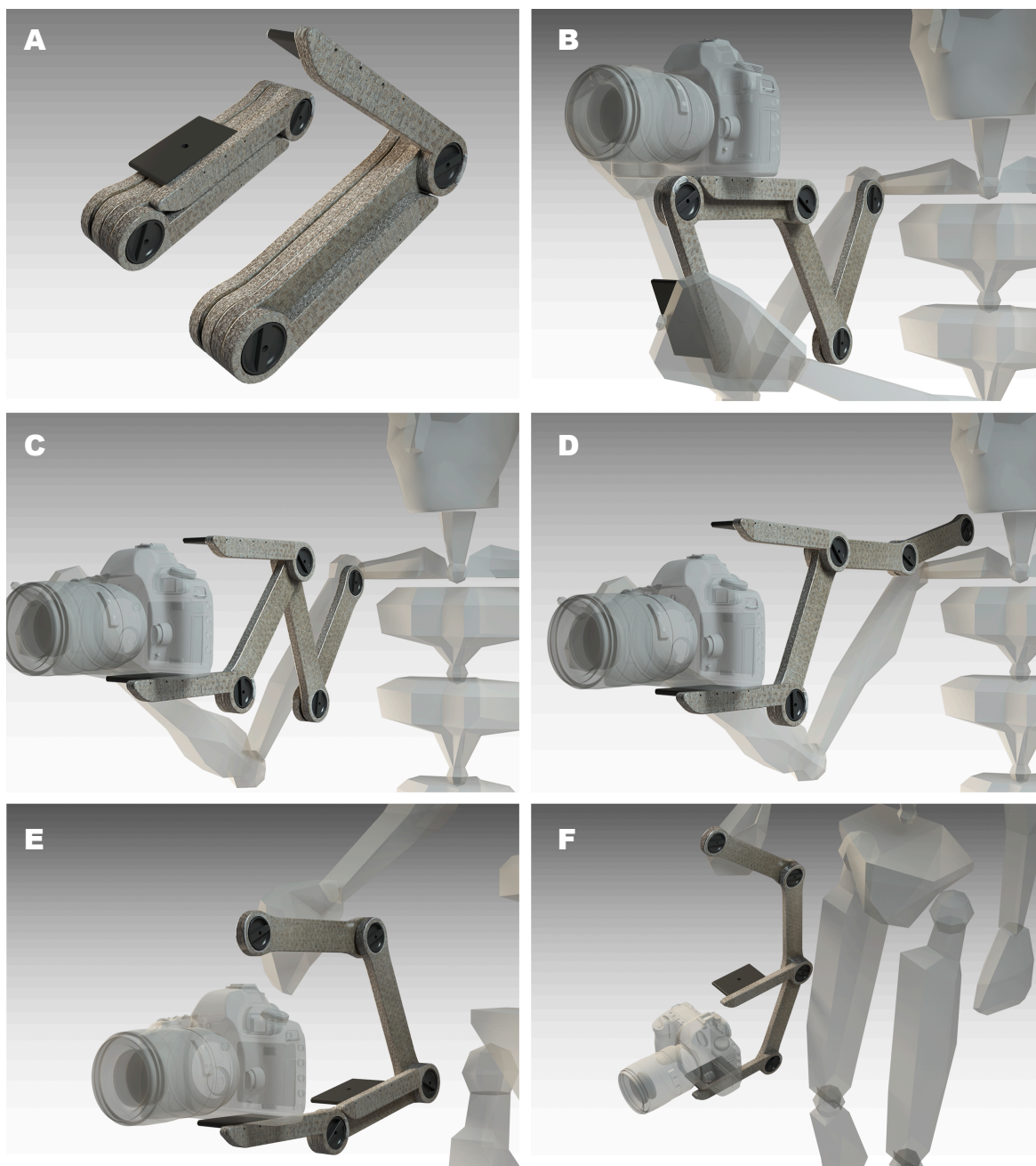
Dado que por motivos alegadamente relacionados com as políticas internas às empresas visadas não ter sido possível aceder a algumas das informações necessárias, decidiu-se desenvolver um produto inspirado nos demais existentes no mercado por marcas como *Cinevate*, *Edelkrone*, *Konova*, *Rhino*, *Skyer*, *Varavon*, entre outras, adaptando a forma e função ao produto descrito de seguida. O objetivo do desenvolvimento deste produto foi permitir um fluxo coerente no desenvolvimento do tema e principalmente servir como base para a ACV comparativa entre os dois materiais quando usados num mesmo contexto, ou seja, num mesmo produto. Além disso, as características relacionadas com a forma refletem os constrangimentos associados a métodos de fabrico viáveis para este tipo de materiais [61-66].

### **3.2. Modelação e especificações do produto**

O produto foi modelado com recurso a diversas aplicações de modelação tridimensional, recorrendo-se posteriormente à aplicação da textura do compósito obtida a partir de fotografias do compósito fabricado para este projeto e utilizado na produção do protótipo, com o fim de alcançar uma perceção mais realista da aparência do objeto final.

A principal função do produto é garantir uma maior estabilidade no manuseio de uma câmara em modo de filmagem ao utilizador, deste modo o carácter multifuncional do equipamento visa possibilitar essa função de base, proporcionando filmagens em diferentes pontos de vista e ângulos de câmara. Através da Figura 3.1 é possível observar parte da variedade de funções que o

produto possibilita. As especificações do produto encontram-se descritas no capítulo 5 e em anexo (ver anexo A).



*Figura 3.1: Modelação do produto desenvolvido: A) Aspecto do produto fechado; B) Modo de suporte ao peito; C) Modo de suporte ao peito com suporte para acessórios; D) Modo de suporte ao ombro com suporte para acessórios; E) Modo de suporte para filmagens com pontos de vista baixos; F) Modo de suporte para filmagens com pontos de vista muito baixos.*

### 3.3. Tecido híbrido de linho / PLA

No fabrico dos componentes utilizou-se um termoplástico de PLA, reforçado com fibras longas de linho, formado por um tecido designado comercialmente de *Biotex (Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack)* com  $500\text{g/m}^2$ , cedido pelo Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI). As características mecânicas do material em questão encontram-se descritas em pormenor no capítulo 4.

As fibras de reforço apresentam-se dispostas em fio, que por sua vez se encontra entrelaçado perpendicularmente formando um tecido com um entrelaçamento designado tecnicamente de *hopsack*, que consiste numa sequência alternada e ininterrupta entre os fios. Neste tecido em específico, essa estrutura é formada por conjuntos de 4 fios agrupados, tal como se pode observar na Figura 3.2, obtendo assim denominação de *4x4 hopsack*. Como principal particularidade, importa destacar que o fio que constitui o tecido possui o polímero de PLA misturado sob a forma de filamentos juntamente com as fibras de linho. Os fios são portanto constituídos por filamentos de linho misturados com filamentos de PLA, em que a fibra de linho constitui 40% da massa volúmica. Esta característica facilita consideravelmente o processamento geral do tecido e a impregnação do termoplástico no reforço, uma vez que os filamentos do polímero irão fundir e fluir rapidamente formando uma matriz com baixa porosidade. Evitam-se deste modo procedimentos complementares e o uso de aditivos quando se procede à consolidação do compósito. É ainda aconselhável a secagem do tecido para remoção da humidade existente nas fibras de linho que pode comprometer seriamente o desempenho do compósito [67], [68].

Segundo o fabricante, a gama *Biotex* inclui os seguintes produtos: fios de fibras naturais de linho e juta, tecidos com diferentes padrões de entrelaçamento e gramagens por  $\text{m}^2$ , com ou sem mistura de fibras termoplásticas de PLA ou PP [68].

Na produção do fio são usadas tecnologias denominadas de “*Twistless*” e “*low-twist*” que garantem um elevado grau de alinhamento das fibras, evitam defeitos de torção, proporcionam melhor impregnação e maior desempenho, possibilitando o fabrico de biocompósitos de alta performance, com propriedades mecânicas comparáveis a alguns termoplásticos reforçados com fibras de vidro. Segundo o fabricante, os materiais produzidos com tecidos *Biotex* apresentam vantagens como: fácil processamento, redução de peso, redução de vibrações e redução de custo de componentes. A tudo isto acrescenta-se um aspeto esteticamente mais atrativo e o facto de poder representar um menor impacto ambiental. Além disso, a disposição de fibras em tecido permite uma orientação das fibras da forma desejada [67], [68].

A partir da figura 3.3. pode observar-se uma fotomicrografia de um fio aplanado, extraído do tecido que forma o compósito em estudo, efetuada no microscópio ótico com câmara fotográfica acoplada existente no Laboratório de Materiais do DEM, na Escola Superior de

Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. Foi utilizada uma lente objetiva de 50x e lentes oculares de 10x, resultando numa imagem ampliada de 500x.

Apesar da reduzida profundidade de campo da fotomicrografia gerada, é possível distinguir os diferentes filamentos que compõem o fio, e os pequenos defeitos nas fibras de linho (transparentes) sob a forma de pequenos nódulos, ou pontos fracos, distribuídos aleatoriamente ao longo do comprimento da fibra.



Fig. 3.2: Configuração do tecido Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack 500g/m<sup>2</sup>.

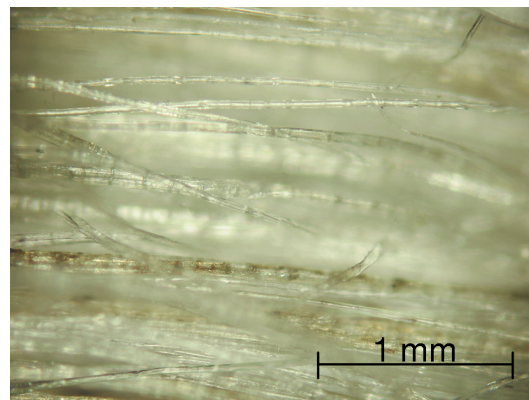


Fig. 3.3: Fotomicrografia: Aspeto longitudinal dos filamentos PLA/Linho num fio aplanado de tecido Biotex.

### 3.4. Processo de fabrico

O fabrico dos componentes envolveu a produção de uma placa de laminado de biocompósito e a posterior prototipagem através de maquinaria CNC. Foi produzida uma placa de laminado de dimensões 240x240x10 mm<sup>3</sup> com 22 camadas de tecido híbrido *Biotex* (*Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack*) com uma gramagem de 500g/m<sup>2</sup>, e uma percentagem volúmica de 40 % de fibras de linho, cedido pelo INEGI.

Os processos aconselhados pelo fabricante para a consolidação do tecido híbrido de linho e PLA incluem a moldação por compressão, moldação a vácuo e a moldação em autoclave. Com parâmetros de temperatura entre os 180-200°C e pressão entre 1-50 bar, o fabricante destaca ainda que, devido à possível degradação térmica do linho durante o processamento, deve ser evitada a exposição prolongada à temperatura e o uso de temperaturas excessivas [68].

Para consolidação da placa, recorreu-se ao método de moldação por compressão a quente, numa prensa hidráulica de pratos quentes existente no INEGI (ver Figura 3.4). A espessura foi garantida com a utilização de calços calibrados com 10mm colocados sobre o prato inferior. O procedimento de fabrico da placa envolveu os seguintes passos:

- Secagem prévia à temperatura de 60°C (durante 6h00);
- Aquecimento do tecido até aos 180°C (cerca de 1h00);
- Estágio de 20 min a 180°C e 2 bar de pressão;
- Arrefecimento lento, com circulação de água até à temperatura de 60°C seguido de abertura da prensa e restante arrefecimento ao ar ambiente (aproximadamente 2h para arrefecer de 180°C até aos 60°C).

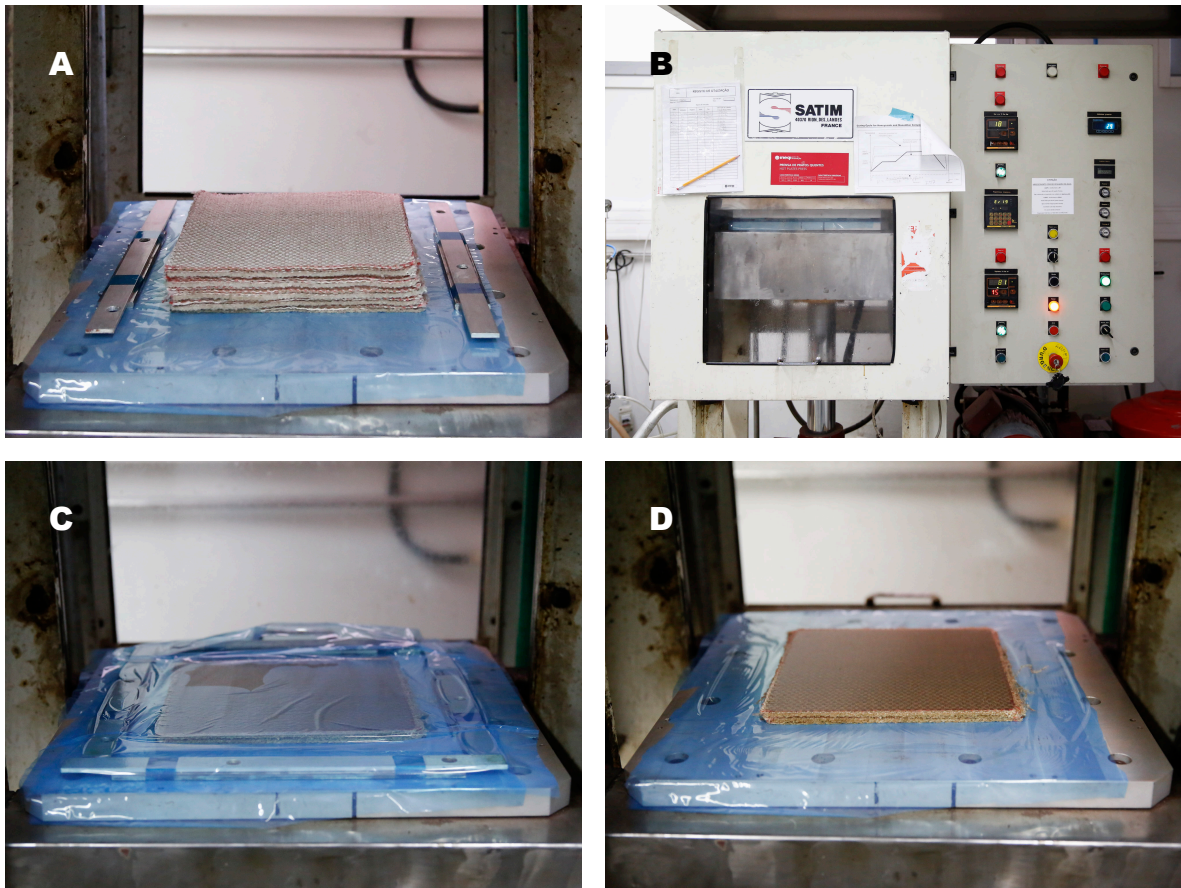
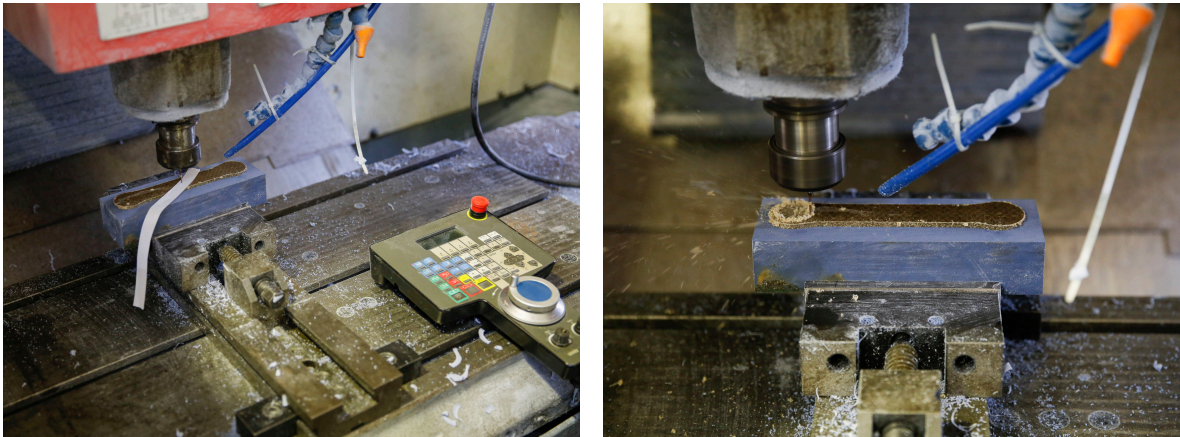


Figura 3.4: Processo de consolidação da placa de laminado na prensa hidráulica de pratos quentes:  
 A) Camadas de tecido sobre a prensa; B) Prensa fechada durante o processo de consolidação; C) Aspecto da placa com o plástico moldante após a abertura da prensa; D) Aspecto da placa consolidada.

Os componentes foram produzidos a partir da placa de laminado descrita anteriormente, por maquinação CNC, no centro de maquinação de três eixos de marca e modelo: *Cincinnati Milacron - Arrow 1000*, existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (ver Figuras 3.5 e 3.6).

Dadas as características do material e com o fim de obter bons resultados, foram utilizadas velocidades de maquinação altas, sendo que o *Spindle* foi programado para uma velocidade de rotação de 6250 rpm (110%). O arrefecimento foi efetuado com ar comprimido para impedir que a fibra fosse sujeita ao contacto com água, evitando assim um aceleração da degradação do material. As ferramentas utilizadas podem ser consultadas em anexo (ver anexo E).



*Figura 3.5 e 3.6: Processo de maquinação CNC dos componente estruturais.*



*Figura 3.7: Aspeto de um dos componentes logo após a maquinação CNC.*

A placa de laminado produzida (ver Figura 3.4), utilizada no fabrico dos componentes do protótipo apresentou uma boa consolidação e compactação. Não se observou variações de espessura ou qualquer indício de desintegração. Os resultados do acabamento final da maquinação foram bastante satisfatórios tal como se pode observar na Figura 3.7, não tendo ocorrido qualquer defeito aparente nos três componentes de biocompósito maquinados. De facto, verificou-se que este material não apresentou problemas de maquinação associados.



# 4 Estudo de caracterização mecânica

---

As análises para caracterização mecânica são indispensáveis para entender as potencialidades dos materiais, delimitar o âmbito do seu uso e efetuar comparações detalhadas com outros materiais.

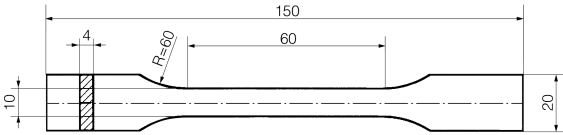

No presente estudo, analisaram-se algumas das propriedades mecânicas do biocompósito produzido, aplicado na estrutura do produto de referência, através da realização de ensaios comuns de flexão em três pontos e de ensaios de tração. Compararam-se ainda algumas destas propriedades com diferentes compósitos de PP reforçado com fibras de vidro, material utilizado como referência para comparação no produto em estudo.

## 4.1. Ensaios de caracterização mecânica

Para os provetes utilizados nos ensaios de caracterização mecânica produziu-se uma placa de laminado com dimensões 400x400x4 mm<sup>3</sup> com 9 camadas de tecido Biotex, recorrendo ao método de moldação e ao procedimento experimental utilizados no fabrico da placa de biocompósito a partir da qual foram produzidos os componentes do protótipo (subcapítulo 3.4). A espessura da placa foi garantida com a utilização de calços calibrados com 4mm, colocados sobre o prato inferior.

A série de provetes utilizados na realização dos ensaios de caracterização mecânica foram modelados de acordo com as especificidades descritas nas normas (ver Tabela 4.1). Foram produzidos a partir da placa de biocompósito atrás descrita, por maquinaria CNC, num centro de maquinaria de três eixos de marca e modelo: *Cincinnati Milacron - Arrow 1000*.

Tabela 4.1: Geometria e dimensão das amostras usadas nos ensaios de caracterização mecânica.

Ensaio	Dimensões do provete	Norma
Tração		ISO 527-4
Flexão		ISO 14125

Em seguida apresenta-se uma descrição detalhada dos procedimentos, resultados e análise dos resultados dos ensaios de flexão em três pontos e ensaios de tração.

#### 4.1.1. Ensaios de flexão em três pontos

Os ensaios de flexão foram conduzidos de acordo com a **norma ISO 14125:1998**, própria para a determinação das propriedades à flexão de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras [69].

Foram produzidos **sete provetes** conforme as dimensões indicadas na Tabela 4.1, recorrendo ao método de fabrico já descrito atrás. Importa salientar que após a maquinação, as arestas dos provetes obtidos foram submetidos à remoção de rebarbas com o uso de duas lixas, primeiramente de granulação média e de seguida de granulação fina.

Após o processo de preparação as sete amostras foram testadas numa **máquina universal de ensaios mecânicos** de marca e respetivo modelo: **Zwick Z100**, utilizando uma **célula de carga de 100kN** (ver Figura 4.1). Os restantes procedimentos foram os delimitados pela norma:

- Velocidade de ensaio de **2mm/min**;
- Distância entre os suportes (*Span L*) ajustado em **64mm**.

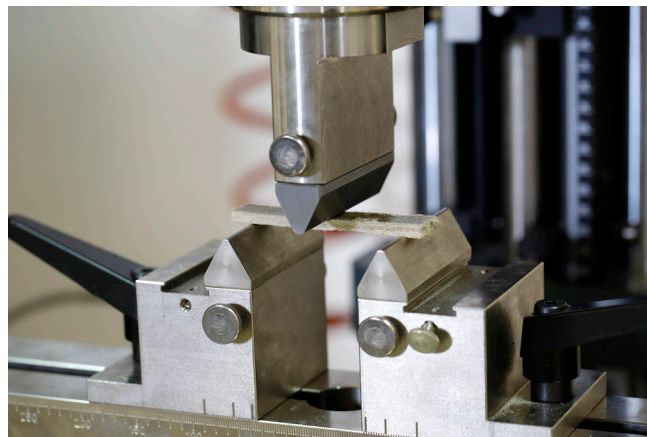


Figura 4.1: Provete apoiado na máquina equipada com respetivo suporte ajustado, pronto para a realização do ensaio de flexão.

## Resultados experimentais

A partir da máquina de ensaios obtiveram-se valores de força e deslocamento. Segundo o método A, indicado na norma supramencionada, para a determinação da tensão e extensão, deverá recorrer-se às seguintes fórmulas de cálculo (Eq. 1 e 2):

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (Eq. 1)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \quad (Eq. 2)$$

Onde:

$\sigma_f$  = tensão de flexão, em megapascals (MPa);

F = força aplicada em Newtons (N);

L = distância entre os apoios, em mm;

b = largura do provete, em mm;

h = espessura do provete, em mm;

$\varepsilon_f$  = deformação na superfície exterior do provete (extensão);

s = deflexão no ponto médio do provete, em mm.

O **módulo de elasticidade** determinou-se através do declive da reta, obtida na zona linear do gráfico de tensão - extensão, considerado o domínio elástico, no intervalo de  $\varepsilon'_f = 0,0005$  e  $\varepsilon''_f = 0,0025$ . Contudo, segundo a norma o módulo de elasticidade poderia ser obtido através da seguinte equação (Eq. 3):

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left( \frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (Eq. 3)$$

Em que:

$E_f$  = Módulo de elasticidade à flexão, em MPa;

$\Delta s$  = diferença entre deflexão final e deflexão inicial;

$\Delta F$  = diferença entre a força final e a força inicial, na deflexão final e inicial, respetivamente.

As curvas tensão-deformação obtidas podem ser observadas no gráfico da Figura 4.2, onde é possível analisar o comportamento de cada amostra quando sujeita à carga em flexão. Importa salientar que o provete 3 (PF3) foi considerado inválido por apresentar resultados bastante discrepantes, tendo sido excluído.

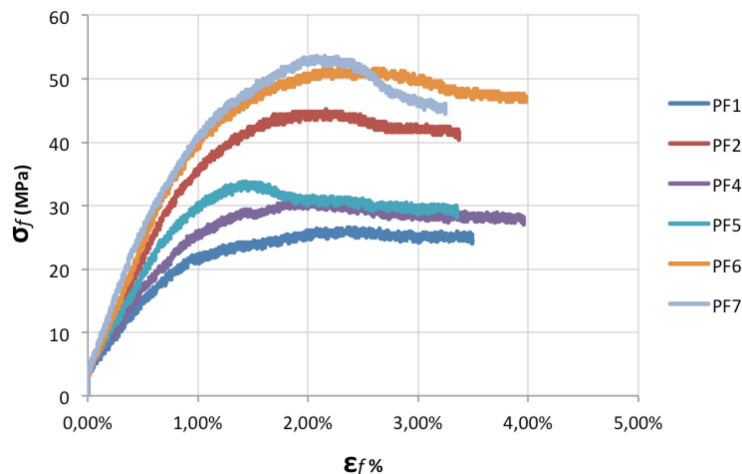


Figura 4.2: Curvas de tensão-deformação geradas pelos ensaios de flexão.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de flexão podem ser observados na Tabela 4.2. para os parâmetros de **resistência à flexão** (valor máximo de tensão suportada pelas amostras no decurso dos ensaios), a **extensão na rotura** (proporção de deformação das amostras no instante da tensão máxima suportada) e o **módulo de elasticidade** à flexão (rigidez do material).

Tabela 4.2: Propriedades do material estudado à flexão.

Provete	Extensão na Rotura (%)	Resistência à flexão (MPa)	Mód. Elasticidade à flexão (MPa)
PF1	2,38	26,6	2282
PF2	2,16	45,2	3458
PF4	1,94	31,04	2626
PF5	1,41	33,83	3001
PF6	2,68	51,6	4057
PF7	2,15	53,59	4751
<b>Média</b>	<b>2,12</b>	<b>40,31</b>	<b>3363</b>
Desvio Padrão	0,43	11,34	923
Valor Máximo	2,68	53,59	4751
Valor Mínimo	1,41	26,6	2282

## Discussão dos resultados

As curvas tensão-deformação experimentais obtidas (ver Figura 4.4) permitem concluir que se trata de um material dúctil, pois é possível observar alguma deformação anterior à rotura. Os resultados obtidos nos ensaios são significativamente mais baixos do que os descritos pelo fabricante (ver Tabela 4.4), sendo previsíveis pelas causas referidas mais à frente no subcapítulo 4.3.3.

### 4.1.2. Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram conduzidos de acordo com a **norma ISO 527-4:1997**, próprias para a determinação das propriedades à tração de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras, isotrópicos e anisotrópicos, e os cálculos para a determinação do módulo de elasticidade, a partir da norma **527-1:1993** [70], [71].

Foram produzidos **sete provetes** segundo as dimensões indicadas na Tabela 4.1, recorrendo ao mesmo método de fabrico e preparação já descrito anteriormente para os ensaios de flexão. Os provetes foram testados na mesma **máquina universal de ensaios mecânicos** indicada atrás, utilizando uma **célula de carga de 10kN**, e amarras específicas para este tipo de ensaio (ver Figura 4.3 e 4.4). A velocidade de ensaio utilizada foi a imposta pela norma para ensaios de qualificação de material:  $v = 2\text{mm/min}$  [71].



Fig. 4.3: Provete instalado na máquina equipada com as respetivas amarras.



Figura 4.4: Aspeto da fratura de uma amostra usada após ensaio de tração.

## Resultados experimentais

Tal como nos ensaios de flexão, obtiveram-se valores de força e deslocamento a partir da máquina de ensaios. A determinação da tensão em tração e da deformação ou extensão foram calculadas, respetivamente, através das seguintes expressões (Eq. 4 e 5):

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (Eq. 4)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (Eq. 5)$$

Em que:

$\sigma_t$  = tensão de tração, em MPa;

F = força medida, em N;

A = área inicial da secção transversal do provete, em mm<sup>2</sup>;

$\epsilon$  = valor da deformação, adimensional ou em percentagem (x100%);

L = distância inicial entre as amarras, em mm;

$\Delta L$  = aumento da distância entre as amarras, em mm.

O **módulo de elasticidade** determinou-se através do declive da reta, obtida na zona linear do gráfico de tensão - extensão, considerado o domínio elástico, no intervalo de  $\epsilon'_f = 0,0005$  e  $\epsilon''_f = 0,0025$ .

No gráfico da Figura 4.5 é possível observar as curvas tensão-deformação obtidas, e analisar o comportamento de cada amostra quando sujeita à tração.

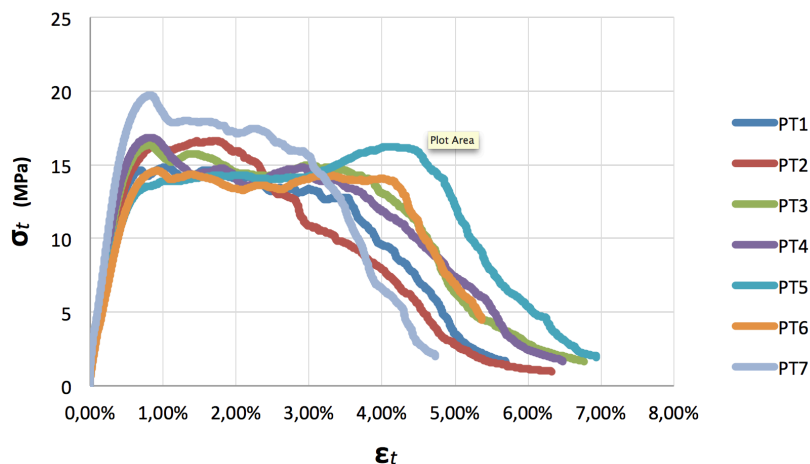


Figura 4.5: Curvas de tensão-deformação geradas pelos ensaios de tração.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de tração podem ser observados na Tabela 4.3. para os parâmetros de **resistência à tração** (valor máximo de tensão suportada pelas amostras no decurso dos ensaios), a **extensão na rotura** (proporção de deformação das amostras no instante da tensão máxima suportada), e o **módulo de elasticidade à tração** (rigidez do material).

*Tabela 4.3: Propriedades do material estudado à tração.*

<b>Provete</b>	<b>Extensão na Rotura (%)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Mód. Elasticidade à tração (MPa)</b>
PF1	1,03	14,83	2898
PF2	1,71	16,62	2840
PF3	0,81	16,35	3003
PF4	0,82	16,85	3193
PF5	4,09	16,24	2519
PF6	0,91	14,60	2367
PF7	0,82	19,71	3592
<b>Média</b>	<b>1,46</b>	<b>16,46</b>	<b>2916</b>
Desvio Padrão	1,20	1,68	409
Valor Máximo	4,09	19,71	3592
Valor Mínimo	0,81	14,60	2367

## **Discussão dos resultados**

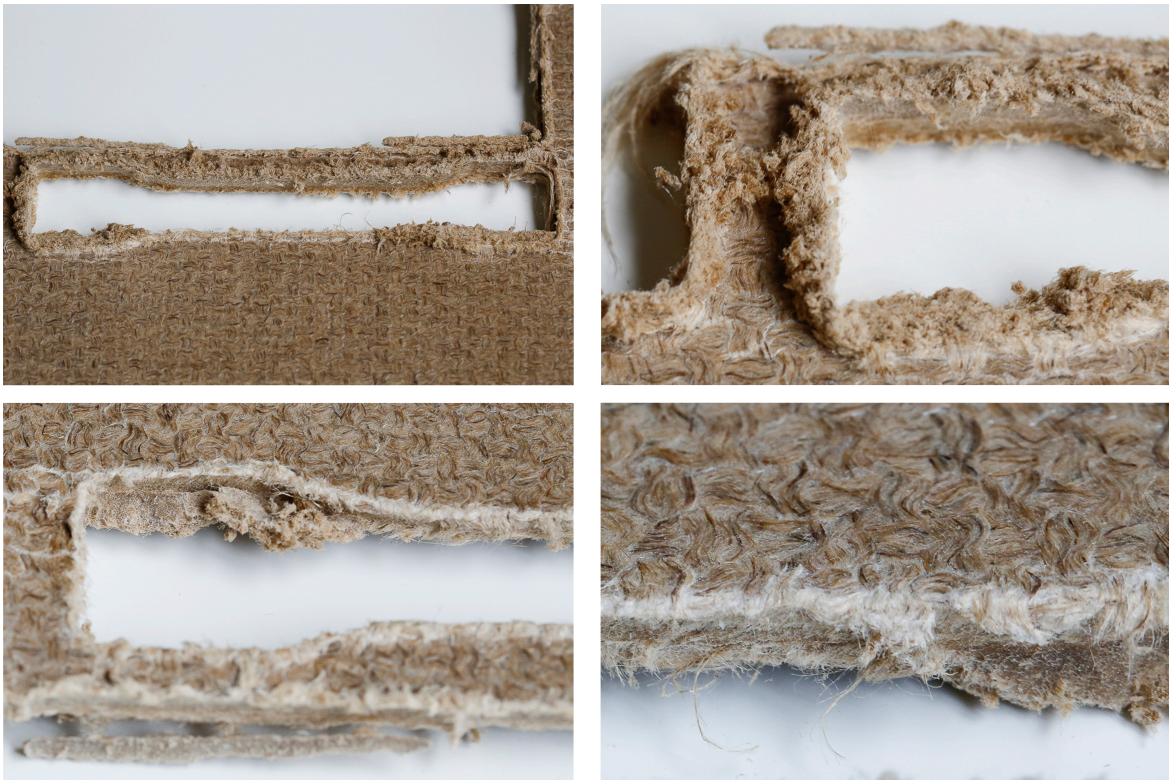
A evolução das curvas experimentais de tensão-deformação (ver Figura 4.5) permitem concluir que se trata de um material dúctil. Contudo, a partir da análise da Figura 4.4, onde se observa a zona de rotura do provete, identifica-se facilmente que as fibras se encontram distendidas e a ausência da matriz, o que leva a concluir que o aparente comportamento deformável identificável através das curvas, possivelmente resultou da rotura sequencial das fibras e do facto de a matriz não deter efeito significativo, dada a aparente desintegração em pó que se observou na condução dos ensaios. Os valores notavelmente baixos que foram obtidos sugerem também a existência de degradação das fibras de linho. Os resultados apresentam-se significativamente mais baixos do que os descritos pelo fabricante (ver Tabela 4.4), sendo previsíveis pelas causas referidas de seguida.

### **4.1.3. Observações sobre os resultados obtidos**

Importa destacar que a placa usada apresentava uma evidente falta de consolidação, uma fraca adesão entre as camadas de tecido e desintegrava-se com facilidade. Durante e após a maquinação da placa para fabrico dos provetes verificou-se uma deficiente compactação e densificação do material, tal como se pode observar na Figura 4.6. Após a maquinação as fibras encontravam-se facilmente expostas na zona do corte, devido à desintegração da matriz em pó, e as fibras encontravam-se aparentemente mais quebradiças. Identificou-se ainda uma variação da espessura entre o perímetro central e as extremidades da placa, com as extremidades a medir 4mm,

e a zona central cerca de 4,5mm. Importa notar que a placa usada para o fabrico dos componentes do protótipo foi produzida segundo os mesmos parâmetros, contudo possui uma boa consolidação e compactação. Não se observou variações de espessura ou qualquer indicio de desintegração (ver Figura 4.7 e 4.8).

As possíveis causas referidas de seguida não foram analisadas e representam meramente hipóteses. As causas devem-se provavelmente ao facto de a área da placa ocupar parte substancial da superfície dos pratos da prensa e o perímetro da placa possivelmente estar sujeito a uma diferente pressão devido à flexão dos pratos. Outra causa pode ter sido o facto de o tecido ter absorvido muita humidade no momento imediatamente antes de ter sido processado, interferindo com o polímero e resultando na desintegração aparente. Eventualmente, os parâmetros necessitam de ser ajustados, nomeadamente a pressão aplicada, o tempo de exposição à temperatura e o número de camadas para a espessura pretendida.



*Figura 4.6: Detalhes do aspeto da placa usada na produção das amostras, após a maquinação CNC.*

A maquinação da placa usada na produção das amostras realizou-se segundo os mesmos parâmetros de velocidade de rotação do *Spindle* e recorrendo a ferramentas semelhantes à maquinação da placa usada no fabrico dos componentes do protótipo (ver Anexo E). Contudo, esta última apresentou ótimos acabamentos e não revelou qualquer problema de desintegração ou falta de compactação (ver Figura 4.7 e 4.8), contrariamente à placa usada para o fabrico das amostras (ver

Figura 4.6). A placa usada no fabrico dos componentes do protótipo possui uma espessura de 10mm e 22 camadas de tecido, sendo que as características completas encontram-se descritas no capítulo 3.



Fig. 4.7: Detalhes do aspeto da placa usada na produção do protótipo, logo após a maquinação CNC.

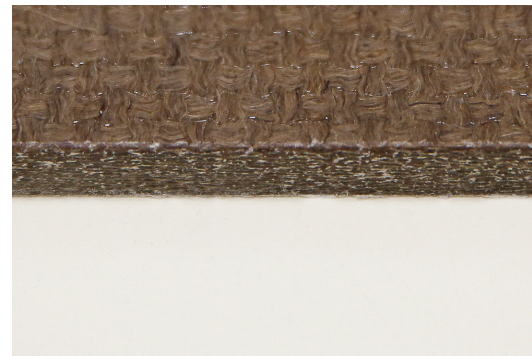


Fig. 4.8: Detalhes do aspeto de um componente retirado da placa à esquerda, logo após a maquinação CNC.

Como consequência, seria previsível obter resultados díspares relativamente aos dados publicados pelo fabricante. E efetivamente os valores de resistência e rigidez obtidos foram significativamente mais baixos. Na Tabela 4.4 é possível observar os resultados obtidos nos ensaios experimentais em comparação com os dados publicados pelo fabricante, para amostras testadas à temperatura ambiente com laminados produzidos pelo método de moldação por compressão a quente com o tecido *Biotex 40% linho e PLA 4x4 Hopsack 500gsm*.

Tabela 4.4: Propriedades de laminados produzidas com o tecido híbrido *Biotex Flax/PLA 4x4 hopsack*, moldados por compressão e testados à temperatura ambiente [72].

Propriedades	Dados Fabricante	Resultados Experimentais	Normas
Conteúdo de fibra (Vol.)	40%	40%	
Densidade	1.33 g/cm <sup>3</sup>	-	
Módulo de tração (GPa)	13.2	2,92	ISO 527-4
Resistência à tração (MPa)	102	16,46	ISO 527-4
Alongamento (%)	1.6	1,46	ISO 527-4
Módulo de flexão (GPa)	7.8	3,36	ISO 14125
Resistência à flexão (MPa)	131	40,31	ISO 14125

Consequentemente, dados os resultados obtidos nos ensaios, previsíveis pelas causas referidas, optou-se por utilizar os dados publicados pelo fabricante para se proceder a uma análise comparativa com outros materiais.

## 4.2. Análise comparativa

As fibras de vidro são amplamente utilizadas devido à boa relação custo-desempenho e disponibilidade. São uma das fibras mais usadas como reforço do PP, podendo este compósito ser processado por meios convencionais, como a moldação por compressão. Na sequência dos objetivos do âmbito do projeto, selecionou-se o PP reforçado com fibras de vidro, por ser um material equiparável ao PLA reforçado com linho em termos de desempenho e propriedades físicas, e por poder ser produzido da forma semelhante ao material em análise.

Os materiais específicos selecionados para comparação são materiais igualmente constituídos por tecidos compostos por fibras e com uma matriz disposta em filamentos de polímero misturados com as fibras de reforço, com padrões de tecelagem balanceados na mesma proporção em duas direções, diferenciando-se somente na geometria. São processados dentro da mesma gama de parâmetros de pressão e temperatura, igualmente pelo processo de moldação por compressão, e testados segundo as mesmas normas ISO 527 e ISO 14125, exceto o compósito com designação comercial Complēt® LGF PP. Este é constituído por fibras desalinhas, testado segundo a norma ASTM D638 e D790 e produzido por moldação por injeção, a partir do material de base sob a forma de *pellets* que são fabricados através de pultrusão, em que as fibras longas de vidro são impregnadas pelo polímero e de seguida é formado um segmento de compósito que é cortado à saída da extrusora em segmentos de cerca de 12mm, originando *pellets* de compósito que posteriormente são usado em moldação por injeção [5], [6].

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados para caracterização mecânica não permitem fazer uma comparação coerente com outro material, pelas razões já indicadas. Deste modo, optou-se por utilizar os dados publicados pelo fabricante das propriedades mecânicas das placas produzidas com o tecido híbrido em estudo (*Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack 500gsm*) produzido pelo método de moldação por compressão a quente e testadas à temperatura ambiente (ver Tabela 4.4 ou 4.5).

As propriedades dos compósitos de PP reforçado com fibras de vidro considerados para comparação, e as propriedades do tecido *Biotex* usado no estudo, assim como também um outro tecido *Biotex* com fibras alinhadas unidireccionalmente, podem ser observadas na Tabela 4.5. apresentada de seguida.

Tabela 4.5: Propriedades dos compósitos considerados para comparação [72-76].

Propriedades	Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack	Biotex Flax/PLA Unidirecional	THERMOPREG™ WRt-0750-PP60B	TWINTEX® T PP	Complēt® LGF PP 30/60
Fibra	Linho	Linho	Vidro	Vidro	Vidro
Matriz (em Filamentos)	PLA	PLA	PP	PP	PP
Conteúdo de fibra (Massa)	-	-	60%	60%	30%-60%
Conteúdo de fibra (Vol.)	40%	40%	35%	34%	-
Padrão de tecelagem	4x4 Hopsack	Unidirecional	2x2 Twill	Twill	Fib.Desalinhasadas
Módulo de tração (GPa)	<b>13.2</b>	27.4	12	14	6.2-11
Resistência à tração (MPa)	<b>102</b>	157	300	300	107-117
Alongamento	1.6%	0.8%	-	-	2-3
Módulo de flexão (GPa)	<b>7.8</b>	22.6	13	13	5.5-10.3
Resistência à flexão (MPa)	<b>131</b>	222	240	280	157-186

Com base na comparação dos valores expostos na Tabela 4.5, conclui-se que:

- Os laminados produzidos em tecido com padrões de tecelagem bidirecional (*Biotex Hopsack*, *Thermopreg*, *Twintex*), processados pelo método de moldação por compressão e testados segundo as mesmas normas, possuem módulos de elasticidade bastante próximos, excepto no *Biotex Flax/PLA* Unidirecional que são significativamente superiores, o que aparentemente os torna em parte quase equiparáveis em termos de rigidez. Contudo, pode observar-se que o *Biotex Hopsack* apresenta um reduzido módulo de flexão relativamente ao módulo de tração;
- Existe um melhoramento significativo das propriedades mecânicas nos laminados produzidos com *Biotex* Unidirecional comparativamente com o *Biotex Hopsack*. No entanto, é importante considerar a natureza unidirecional dos testes e a implicação de um compósito com estas características nas demais aplicações;
- Comparativamente com os compósitos de fibras desalinhasadas e moldados por injeção (*Complēt® LGF PP*), o *Biotex Hopsack* possui propriedades gerais equiparáveis entre si, o que sugere desempenhos mecânicos similares, a uma temperatura ambiente;
- Numa análise geral, observa-se que os valores das tensões máximas ou tensão na rotura, isto é, o valor máximo de tensão suportada pelo provete no decurso do ensaio, são mais altos para a generalidade dos materiais compósitos de PP reforçados com fibras de vidro;
- Os compósitos fabricados em *Biotex* podem ser uma alternativa viável, em termos de desempenho mecânico, aos compósitos de matriz termoplástica de PP reforçados com fibras de vidro.

# 5 Avaliação do Ciclo de Vida

---

O presente estudo de ACV foi desenvolvido de acordo com a série de normas ISO 14040 [26]. Neste âmbito, avaliou-se o impacto ambiental associado à produção de um produto fabricado com um biocompósito, em comparação com o mesmo produto fabricado com um polímero sintético reforçado com fibras de vidro. O produto em causa encontra-se descrito em pormenor no capítulo 4.

Importa referir que a escassez de dados relativos a alguns dos processos tratados no estudo, assim como as balizas geográficas definidas para Portugal, revelaram-se os principais constrangimentos na recolha dos dados. Consequentemente, e seguindo uma metodologia comum em estudos de ACV, adequaram-se alguns dados de referências análogas ajustando os parâmetros contrastantes e extrapolaram-se os resultados para o contexto em estudo.

Em seguida apresenta-se a metodologia desenvolvida no estudo, os procedimentos, os resultados e a sua análise.

## **5.1. Definição dos objetivos e âmbito**

A realização do presente estudo de ACV focou-se na comparação do impacto ambiental associado à produção dos componentes estruturais de um suporte multifuncional de câmara, fabricado com um biocompósito de matriz polimérica em PLA, reforçado com fibras naturais de linho em comparação com o mesmo produto fabricado com um compósito sintético de PP reforçado com fibras de vidro (PFRV).

O **objetivo do estudo** consiste em entender com detalhe que material proporciona maiores vantagens em termos de eficiência ambiental, compreender se existem impactos ambientais muito díspares entre os materiais em estudo, identificar as fases do ciclo de vida e os processos associados aos impactos mais significativos em que se possa introduzir melhorias e sugerir alternativas para melhoria dos resultados.

A **principal função do produto** é “garantir maior estabilidade no manuseio de uma câmara em modo de filmagem” ao utilizador.

Dada a natureza académica do estudo em questão, os **resultados destinam-se a** qualquer pessoa ou entidade interessada em obter mais dados comparativos dos materiais estudados, adaptados a produtos que sirvam os mesmos propósitos ou outros que se adaptem aos mesmos princípios. Resumidamente, os resultados destinam-se a qualquer leitor interessado no assunto.

### **Unidade funcional**

Seguindo as indicações da norma utilizada, definiu-se uma unidade de referência para avaliar os impactos ambientais associados aos processos considerados. Assim a unidade funcional definida para este estudo é: proporcionar a “**estabilização e suporte de UMA câmara**” por tempo indefinido aos utilizadores. Em termos mais objetivos observa-se desde logo que no contexto em questão coincide com uma unidade de produto, isto é, **um suporte**.

### **Cenários de Referência**

Com o objetivo de poderem ser consideradas diferentes hipóteses, criaram-se dois cenários distintos. Em ambos os cenários, o produto é fabricado em Portugal continental. Estes cenários diferenciam-se essencialmente como, produto fabricado com biocompósito e produto fabricado com PP reforçado com fibras de vidro. No primeiro cenário considera-se que além do fabrico do produto, parte significativa da matéria-prima é também produzida em Portugal continental. Mais especificamente, a produção de linho e posterior processamento, a fiação de linho com PLA e posterior tecelagem, o fabrico de todos os componentes considerados, e a montagem do produto. No segundo cenário a produção de matéria-prima é parcialmente produzida em Portugal.

Os cenários surgem identificados ao longo do estudo respetivamente como:

**Cenário A:** Componentes estruturais em Biocompósito.

**Cenário B:** Componentes estruturais em PRFV

As características dos produtos em análise e seus componentes encontram-se descritas em anexo (ver Anexo A).

## 5.2. Inventário

O inventário realizado para sustentar o estudo considera os processos envolvidos em ambos os cenários. Optou-se pela criação de um inventário geral ao invés de um inventário para cada um dos cenários, decompondo processos em subprocessos elementares, e noutros casos agrupando processos para simplificar o processamento da informação e fundamentalmente para facilitar o entendimento dos dados. O inventário inclui todos os materiais utilizados, os coprodutos gerados na produção dos componentes, assim como infraestruturas diversas, a ocupação dos solos, o uso e fabrico dos equipamentos, os transportes entre etapas, o consumo de recursos e energia necessários para a fabricação e manutenção dos equipamentos agrícolas e industriais (tratores, infraestruturas e ferramentas), entre muitos outros, contemplados nas bases de dados utilizadas.

Os **pressupostos** considerados encontram-se descritos ao longo do estudo. Poderia prever-se também o tempo de vida do produto para cada um dos cenários, comparando o grau de desgaste e a degradabilidade entre os materiais em análise, estimando-se assim a sua durabilidade. Contudo, justifica-se prescindir desta análise uma vez que o produto em questão serve um mercado em franco desenvolvimento e existe a possibilidade de se tornar obsoleto por efeito num período curto de tempo.

Os dados detalhados podem ser observados através dos inventários, dos registos e relatórios da recolha de dados, e na análise dos módulos da base de dados *Ecoinvent* utilizados e referenciados nas tabelas de inventário. A informação encontra-se descrita ao longo do estudo e é complementada em anexo (ver Anexos C, D e F).

### **Etapas excluídas do sistema**

Alguns processos foram excluídos do estudo por não interferirem nos resultados da análise comparativa ou por representarem impactos pouco significativos. Foram excluídos em ambos os cenários: os processos relacionados com fases de desenvolvimento do produto; a mão-de-obra humana envolvida nos demais processos; a fase de montagem manual; o desgaste das ferramentas; a fase de secagem dos tecidos, por falta de dados consistentes no momento de visita técnica e não terem sido encontrados dados na literatura ou nas bases de dados utilizadas; os componentes normalizados (parafusos); as infraestruturas e maquinaria na fase de maquinação CNC dos laminados, devido ao facto de não influenciarem o estudo comparativo; e a distribuição em retalho.

A maquinaria e infraestruturas no processo de espadelagem e assedagem do linho também não foram considerados por falta de dados suficientes, contudo, o consumo de energia elétrica foi contabilizado.

As etapas de uso e de descarte também não são consideradas na ACV, ficando as questões de reciclagem dos materiais excluídas à partida, como por exemplo o reaproveitamento e transformação dos materiais em energia.

## Princípio de alocação

Optou-se pela alocação em massa, ao invés de uma expansão de sistema, dado que a contemplação dos elementos de saída não faz parte do objetivo deste estudo, e pelo mesmo motivo, não foi considerada uma alocação económica ou energética. Os impactos são calculados em função da matéria e dos processos utilizados no fabrico do produto, ficando excluída a proporção dos impactos relativos às quantidades geradas de coprodutos.

### 5.2.1. Definição das fronteiras do sistema

A esquematização dos diagramas de fluxo representativos dos sistemas estudados assim como as fronteiras do sistemas, podem ser observados na Figura 5.1, abaixo. O sistema relativo ao cenário A (biocompósito) à esquerda, o cenário 2 (PRFV), à direita.

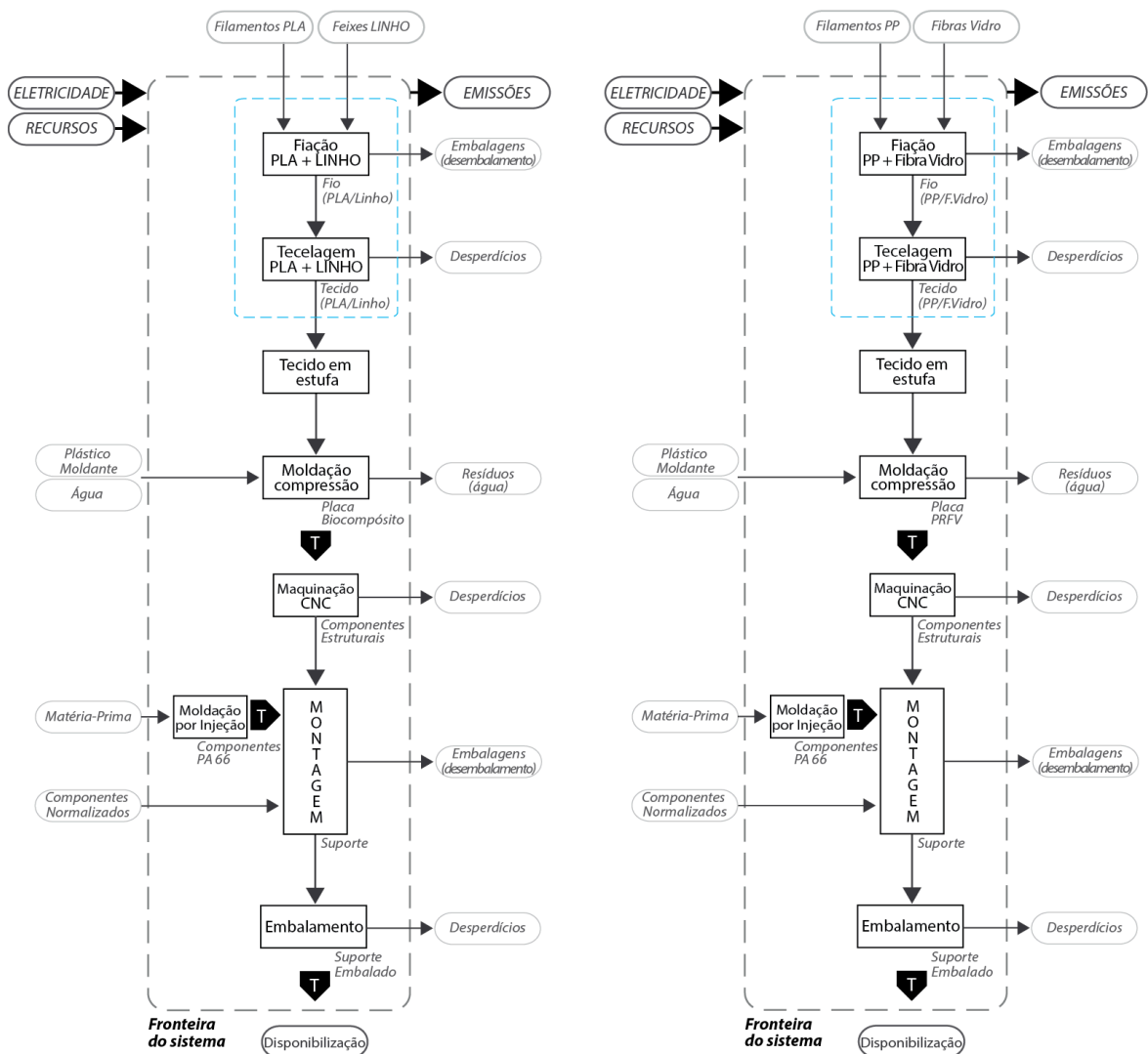


Figura 5.1.: Representação esquemática das fronteiras do sistema da ACV relativo ao Cenário A – biocompósito (esquerda) e Cenário B – PRFV (direita).

### 5.2.2. Recolha de informação e análise da sua qualidade

A criação do inventário baseou-se na reunião e cruzamento de dados através de três meios: numa recolha *in loco* através de visitas técnicas; nas bases de dados *Ecoinvent 2.0*, atualizando e adaptando alguns parâmetros ao presente estudo; e através de pesquisas exaustivas e pormenorizadas na literatura, tais como relatórios publicados por entidades oficiais, artigos científicos, entre outros.

A qualidade dos dados atesta-se pela coerência da abordagem, que depende dos fatores temporais, tecnológicos e geográficos. Para sustentar uma concordância dos **fatores temporais**, os dados foram baseados em estudos recentes; alteraram-se alguns dos módulos nas bases de dados por forma a obter resultados mais representativos para o ano de 2014; adicionalmente, as visitas técnicas, também foram efetuadas durante o ano de 2014. Relativamente aos **fatores tecnológicos**, os dados utilizados refletem naturalmente a tecnologia utilizada atualmente, e encontram-se estritamente associados aos **fatores geográficos** neste estudo, que se restringem essencialmente a Portugal continental. Todas as fases de cultivo e produção do linho, processamento das fibras, fabrico dos compósitos, fabrico dos componentes, embalagens, energia elétrica, respetivas tecnologias e infraestruturas, estão associadas a Portugal continental. Foram também alterados alguns dos módulos nas bases de dados por forma a obter resultados representativos dos fatores em questão. Alguns dos dados específicos referem-se a médias europeias por serem os mais representativos para Portugal, como por exemplo, os dados relativos às fibras de vidro são o resultado da média de vários estudos junto desta indústria em diferentes locais na Europa.

Todos estes dados são descritos e referenciados em pormenor e podem ser analisados ao longo do estudo e em anexo.

### 5.2.3. Processamento dos dados (inventário)

Os dados utilizados no inventário tiveram como base a identificação e quantificação dos elementos dos fluxos de entrada e saída de cada um dos processos envolvidos nos sistemas em estudo. São contabilizados os consumos energéticos, as matérias-primas e outros recursos como a ocupação de terra, e também os transportes, assim como os diferentes tipos de emissões, os resíduos produzidos e desperdícios.

O inventário foi organizado de forma sequencial respeitando o fluxo dos sistemas estudados. Os processos contemplados no inventário estão listados em seguida sendo tratados individualmente ao longo do capítulo e a informação detalhada encontra-se em anexo (ver Anexo F).

### **Processos contemplados no inventário** (ver também Anexo F):

- Modelação do inventário relativo à produção e consumo de energia elétrica em Portugal;
- Cultivo do linho;
- Linho espadelado (Trituração, Ripagem, Espadelagem);
- Feixe de filamentos de fibras de linho processado (Assedagem);
- Filamentos PLA;
- Filamentos PP;
- Fiação (PLA + Linho);
- Fiação (PP + Fibras Vidro);
- Tecelagem (PLA + Linho);
- Tecelagem (PP + Fibras Vidro);
- Produção de laminado de (PLA + Linho);
- Produção de laminados de (PP + Fibras Vidro);
- Maquinação CNC (Componentes estruturais);
- Fabrico do componente em PA66 (moldação por injeção).

### **Modelação do inventário relativo à produção e consumo de energia elétrica**

Os dados do inventário relativos à energia elétrica são adequados à situação energética em Portugal para o ano de 2014. O inventário foi determinado e adaptado de acordo com o Mix Energético relativo à eletricidade fornecida a empresas em Portugal (ver Tabela 5.1), cruzando dados disponibilizados pela empresa Energias de Portugal, S.A. (EDP) e pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), considerando as fontes de energia renováveis e não renováveis.

Os dados relativos às perdas de energia na rede de distribuição estão contempladas nas bases de dados, nas fases de alta, média e baixa tensão, assim como as infraestruturas.

As informações presentes nas bases de dados aplicadas a cada um dos métodos de produção de eletricidade, são representativos de Portugal (PT), mas também de médias europeias (RER), da União para a Coordenação da Transmissão de Eletricidade (UCTE), e Suíça (CH). O desempenho ambiental de cada método de produção de energia elétrica resulta assim na extrapolação dos dados disponibilizados no inventário em conformidade com o Mix Energético de Portugal.

Tabela 5.1. Mix energético detalhado e síntese dos dados usados na modelação do inventário relativo à origem da energia elétrica consumida em Portugal.

Fonte de energia	Porcentagem	Fonte	Nome do módulo de dados utilizado	Base dados
<b>RENOVÁVEIS</b>				
Hídrica	29%	[77]	<i>Electricity, hydropower, at power plant/PT U</i>	Ecoinvent 2
Eólica	10,5%	[77]	<i>Electricity, at wind power plant/RER U</i>	Ecoinvent 2
RSU	0,3%	[77]	<i>Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U</i>	Ecoinvent 2
<b>Cogeração Renovável:</b>	4,2%	[77]	<i>(Segundo a EDP)</i>	
<i>Biomassa</i>	3,62%	[78]	<i>Electricity, at cogen 6400kWh, wood, emission control, allocation exergy/CH U</i>	Ecoinvent 2
<i>Biogás</i>	0,58%	[78]	<i>Electricity, at cogen with biogas engine, allocation exergy/CH U</i>	Ecoinvent 2
<b>Outras Renováveis:</b>	1,7%	[77]	<i>(Segundo a EDP)</i>	
<i>Biomassa</i>	0,81%	[78]	<i>Electricity, wood, at distillery/CH U</i>	Ecoinvent 2
<i>Geotérmicas</i>	0,21% * <sup>1</sup>	[78]		
<i>Marés</i>	* <sup>1</sup>	[78]		
<i>Ondas</i>	* <sup>1</sup>	[78]		
<i>Fotovoltaica</i>	0,67%	[78]	<i>Electricity, production mix fotovoltaic, at plant/PT U</i>	Ecoinvent 2
<b>FÓSSEIS</b>				
Gás Natural	4,7%	[77]	<i>Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U</i>	Ecoinvent 2
Carvão	29%	[77]	<i>Electricity, hard coal, at power plant/PT U</i>	Ecoinvent 2
Nuclear	9,6%	[77]	<i>Electricity, nuclear, at power plant/UCTE U</i>	Ecoinvent 2
Fuelóleo	0,3%	[77]	<i>Electricity, oil, at power plant/PT U</i>	Ecoinvent 2
Cogeração Fóssil	10,7% * <sup>2</sup>	[77]	<i>Electricity, at cogen 200kWe diesel SCR, allocation exergy/CH U</i>	Ecoinvent 2

1\* Fontes de energia Geotérmica, Marés e Ondas não foram consideradas por representarem bastante menos de 1% do total de eletricidade produzida em 2014, e por falta de bases de dados adequadas para análise dos impactos ambientais associados. Além disso, a energia elétrica de origem geotérmica e de marés é produzida e consumida exclusivamente nos Açores.

2\* Pressuposto para a produção de energia a partir de fuelóleo e de outros combustíveis fósseis. Por falta de dados detalhados do mix de cogeração fóssil, não se considerou outras fontes como o Gás Natural.

## Produção de feixe de filamentos de fibras de linho processado

O inventário do presente processo considera as fases envolvidas na produção de mecha de linho, desde o cultivo do linho até à disponibilização dos filamentos de fibras agrupados em feixes. Os dados são quantitativos e baseados na literatura referenciada ao longo do inventário. O procedimento é descrito de forma simplificada de seguida, por segmentos, considerando as entradas e saídas referentes ao processo integral.

Os dados contemplados no inventário relativo ao cultivo do linho são representativos para 1 hectare. Os módulos utilizados na base de dados Ecoinvent contemplam desde logo grande parte dos processos implicados. São considerados os vários recursos e processos envolvidos tais como, o fabrico, uso e manutenção da maquinaria agrícola, a preparação do solo, tratamentos, colheita e maceração, fertilizantes, aditivos e pesticidas. São considerados igualmente os consumos

energéticos e de combustíveis, transporte, as infraestruturas, armazenamento, a ocupação do solo, e outros recursos, e as emissões diversas relativas aos demais processos envolvidos. São ainda consideradas as perdas de matéria ao longo dos processos de transformação das fibras. Importa ainda salientar que é considerada a **captura de carbono por fotossíntese**.

A síntese do fluxo de processos envolvidos na produção de filamentos de linho pode ser observada na Figura 5.2.

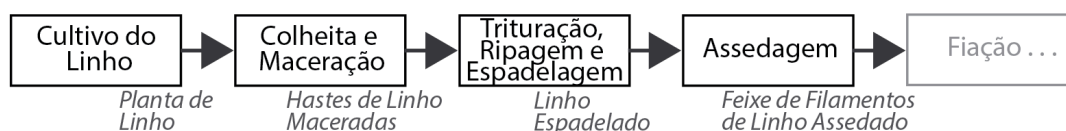


Figura 5.2: Fluxo de processos envolvidos na produção de filamentos de linho assedado.

Na literatura, os dados de rentabilidade do linho variam bastante. Após o processamento completo, incluindo todas as perdas e a fase do processo de fiação, os valores variam entre 512Kg a aproximadamente 1000 Kg, para colheitas de linho verde na ordem dos 6000 a 7500Kg. Considerou-se o menor número de fontes possível, pois o cruzamento de dados é passível de gerar incongruências e exige uma análise exaustiva [79-81].

O inventário completo e detalhado com dados específicos ao cultivo do linho, e às etapas gerais de processamento das fibras de linho e produção dos feixes de linho, encontra-se em anexo (ver Anexo F).

**Sementes:** O impacto relativo à produção das sementes como dado de entrada não foi ponderado. Sendo um dos coprodutos, e ponderando apenas os fatores associados a um coeficiente de alocação em massa, conclui-se que a sua produção é autossustentável, e uma vez que o processamento das sementes é simples, não se justificou considerar tal questão.

Vários estudos apresentam diferentes dados acerca da quantidade de sementes necessárias para o cultivo de linho, justificado por fatores tais como, os métodos e tecnologias usada no cultivo, a variação da densidade da plantação, ou seja, o número de pés por m<sup>2</sup>, entre outros. A título de exemplo, num campo de cultivo, a quantidade de sementes necessárias para a produção de linho em 1 ha é de aproximadamente 115Kg. A área desse mesmo campo capaz de produzir esses mesmos 115Kg de sementes é respetivamente 0,3 ha. Adicionalmente, segundo as estatísticas da FAO, o volume da produção de sementes, e as sementes obtidas por hectare, variam anualmente para uma mesma região. Dependendo de aspetos relacionados com as dinâmicas ambientais e biológicas, e também, com a variação da quota do tipo de linho cultivado que pode variar anualmente por região, isto é, a proporção entre o cultivo de linho para produção de sementes e cultivo de linho para produção de fibras [5], [41], [80].


**Fertilizantes e Pesticidas, Diesel e Eletricidade:** Consideraram-se os fertilizantes mais comuns, citados na literatura, e já descritos em pormenor no capítulo 2. São eles, o Cloreto de Potássio, Nitrato de Amónio e Superfosfato Triplo. Outro elemento de uso relevante, o Calcário Agrícola, foi também considerado. Relativamente aos pesticidas (fungicidas, herbicidas e inseticidas), foram utilizados dados quantitativos gerais obtidos na literatura. A especificação de cada um dos elementos e a volatilidade associada a cada um em particular, apresenta-se definida no módulo selecionado na base de dados utilizada. A energia elétrica e combustíveis estão contemplados nos módulos dos processos utilizados através da base de dados.

**Produtos, Coprodutos e Emissões diretas:** O uso de fertilizantes, pesticidas, eletricidade e combustíveis, implica emissões diretamente associadas. Estes dados foram obtidos na literatura e estão ponderados na base de dados. Considerou-se a produção de 7500 Kg/ha de hastes de linho verde secas, através da qual, e após processamento completo se obteve aproximadamente 1000Kg/ha de feixes de linho assedado.

### **Maquinação CNC dos componentes estruturais**

Os dados para o cálculo dos consumos de energia elétrica do presente processo, foram recolhidos no momento da maquinação do protótipo, num centro de maquinação CNC: *Cincinnati A100*, existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEM, na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. Os dados e os métodos usados para o cálculo dos consumos estão descritos nos relatórios de recolhas de dados em anexo (ver Anexo C e D). Foi também calculado o volume de desperdício gerado na maquinação para uma situação hipotética (ver Anexo B).

### **Transportes**

Os transportes foram definidos em etapas específicas tal como assinalado no sistema (  ) (ver Figura 5.1) e encontram-se incluídos em cada um dos processos e subprocessos que exigem transporte. O módulo da base de dados utilizado inclui a produção dos veículos, a operação, manutenção e disposição final. Assim como, o consumo de combustíveis e emissões, a construção das rodovias e outras infraestruturas, e a ocupação dos solos.

### **Outros**

Os restantes processos contemplados no inventário foram modelados com recurso aos inventários criados acima e recorrendo a módulos presentes na base de dados *Ecoinvent*, alterando apenas alguns subprocessos por forma a obter dados mais representativos. Os módulos utilizados podem ser consultados no inventário em anexo.

### 5.3. Análise dos resultados e avaliação dos impactos ambientais

Os dados foram tratados com recurso ao software *SimaPro*, foi adotado o método de análise *CML2 baseline 2000* modificado de modo a integrar um indicador para o “uso e ocupação de solo” através do método *CML 2001*. A escolha derivou do facto de este ser um método abrangente, fiável e exequível para a avaliação pretendida.

A análise é focada no desempenho ambiental em termos gerais, fundamentando-se nos indicadores definidos: Depleção de recursos Abióticos; Acidificação; Eutrofização; Aquecimento Global (para um intervalo de 100 anos); Destruição da Camada de Ozono; Toxicidade Humana; Eco-toxicidade dos meios aquáticos (água doce); Eco-toxicidade aquática marinha; Eco-toxicidade Terrestre; Oxidação fotoquímica; Uso e ocupação do solo. A descrição e âmbito de cada um destes indicadores encontra-se descrito no capítulo 2, subcapítulo 2.1.5.

Não se determinaram fatores de ponderação com o objetivo de restringir o número de indicadores. E além disso, tratando-se da comparação de um mesmo produto que difere somente nos materiais empregues nos componentes estruturais, não se recorreu a qualquer método de avaliação que permita uma interpretação e categorização normalizada, tal como por exemplo no caso da atribuição de uma declaração ambiental de produto (EPD).

Os resultados são apresentados recorrendo a tabelas, gráficos e diagramas com os valores obtidos, a indicação das unidades equivalentes dos impactos, a caracterização relativa em percentagem, os dados normalizados e os diagramas com a fração dos processos que representam maior impacto na vasta rede dos milhares de processos envolvidos. Estes últimos encontram-se em anexo (ver Anexo G).

#### Resultados

Os resultados reúnem:

- Comparação geral entre os dois cenários de referência (A e B);
- Breve comparação entre os tecidos (tecido de PLA + linho e tecido de fibras vidro + PP);
- Breve comparação entre: fibras de linho e fibras de vidro; PLA, PP, PA 66 e PC;
- Identificação dos processos que mais contribuem para os impactos por cada indicador.

#### Comparação geral entre os cenários de referência (A e B)

De seguida, são apresentados os resultados da comparação entre os Cenários A e B, ou seja, a comparação entre os suportes de câmara produzidos com estrutura em Biocompósito e com PRFV respetivamente. A Tabela 5.2 apresenta os resultados de caracterização por indicador de categoria de impacto ambiental e a conversão dos mesmos em valores relativos por percentagem. Na Figura 5.3 pode observar-se um gráfico com mesmos resultados por indicador em valores relativos.

Tabela 5.2. Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente ao Cenário B.

Categoria de Impacto	Unidade	CENÁRIO A Biocomp.	CENÁRIO B PRFV	CENÁRIO A (Relativo %)	CENÁRIO B (Relativo %)
Recursos Abióticos	kg Sb eq	0,028	0,036	77,2	100
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	0,022	0,025	87,7	100
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> eq	0,0031	0,0024	100	76,4
Aquecimento Global	kg CO <sub>2</sub> eq	3,08	4,17	73,9	100
Camada de ozono	kg CFC-11 eq	2,2E-07	2,3E-07	97,4	100
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	1,010	2,17	46,7	100
Eco-tox. (água doce)	kg 1,4-DB eq	0,200	0,184	100	91,7
Eco-tox. (marinha)	kg 1,4-DB eq	313	345,9	90,5	100
Eco-tox. (terrestre)	kg 1,4-DB eq	0,0462	0,049	94	100
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,00085	0,001	84,9	100
Uso e ocupação do solo	m <sup>2</sup> ano	1,5	1,16	100	76,9

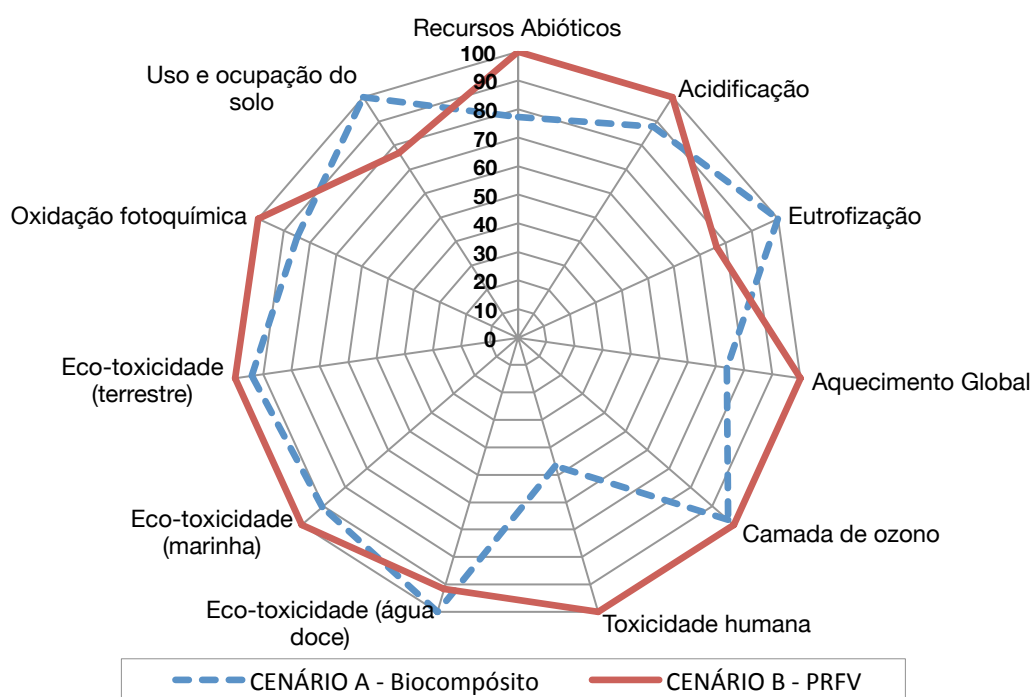


Figura 5.3: Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente com o Cenário B - valores relativos em percentagem (%).

Comparativamente com o cenário A (suporte com biocompósito), a produção e fabrico do suporte relativo ao Cenário B (suporte com PRFV), representa maiores impactos para a maioria dos indicadores. O cenário A apresenta impactos expressamente menores no indicador de toxicidade humana (-53,3%) e menores impactos também nos indicadores de depleção dos recursos abióticos (-22,8%), aquecimento global (-26,1%), acidificação (-12,3%), redução da camada de ozono (-2,6%), eco-toxicidade (marinha) (-9,5%), eco-toxicidade (terrestre) (-6%) , e oxidação fotoquímica (15,1%). Contudo o cenário B, apresenta impactos menores relativamente a eutrofização (-23,6%), eco-toxicidade (água doce) (-8,3%), e no uso e ocupação do solo (-23,1%).

Através dos dados normalizados e considerando o grau de impacto de cada um dos indicadores finais é permitida uma ponderação diferenciada dos potenciais impactos. Tal como se pode observar a partir da Figura 5.4, os indicadores que apresentam um maior impacto são: depleção de recursos abióticos e eco-toxicidade (marinha). Sendo que a acidificação, aquecimento global e eco-toxicidade (terrestre) também representam um peso relevante.

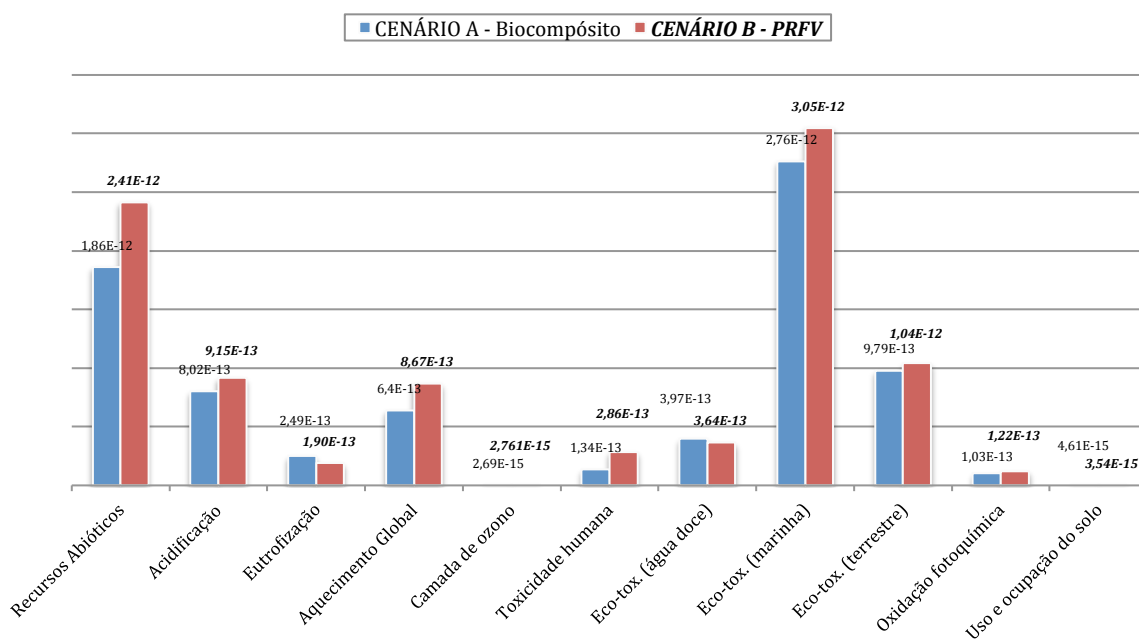


Figura 5.4: Normalização dos resultados dos impactos do Cenário A comparativamente ao Cenário B.

### Breve comparação entre os tecidos de PLA+fibras de linho e PP+fibras de vidro

Com objetivo de entender com maior detalhe quais os processos mais responsáveis pelos impactos, procedeu-se a uma análise sumária de alguns processos envolvidos no fabrico isolando parte do sistema dos cenários de referência. Desta forma, efetuou-se uma breve análise dos processos referentes à produção dos tecidos utilizados excluindo os processos posteriores, uma vez que são comuns a ambos os cenários.

A Tabela 5.3, contém os dados de caracterização por indicador de categoria de impacto ambiental e a conversão dos mesmos em valores relativos por percentagem. Na Figura 5.5 é possível observar o gráfico com os resultados por indicador em valores relativos e na Figura 5.6 pode observar-se o gráfico com resultados normalizados.

Tabela 5.3. Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente com o Cenário B (Tecidos).

Categoria de Impacto	Unidade	CENÁRIO A	CENÁRIO B	CENÁRIO A	CENÁRIO B
		Linho+PLA	Vidro+PP	(Relativo %)	(Relativo %)
Recursos Abióticos	kg Sb eq	0,0058	0,0137	42	100
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	0,0045	0,0074	60	100
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> eq	0,0014	0,0006	100	45,2
Aquecimento Global	kg CO <sub>2</sub> eq	0,2650	1,3337	19,8	100
Camada de ozono	kg CFC-11 eq	5,46E-08	5,90E-08	92,4	100
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	0,2190	1,3686	16	100
Eco-tox. (água doce)	kg 1,4-DB eq	0,0709	0,0518	100	73,2
Eco-tox. (marinha)	kg 1,4-DB eq	66,8	95,4	70	100
Eco-tox. (terrestre)	kg 1,4-DB eq	0,0041	0,0069	59,3	100
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,0002	0,0003	53,6	100
Uso e ocupação do solo	m <sup>2</sup> ano	0,4400	0,0735	100	16,7

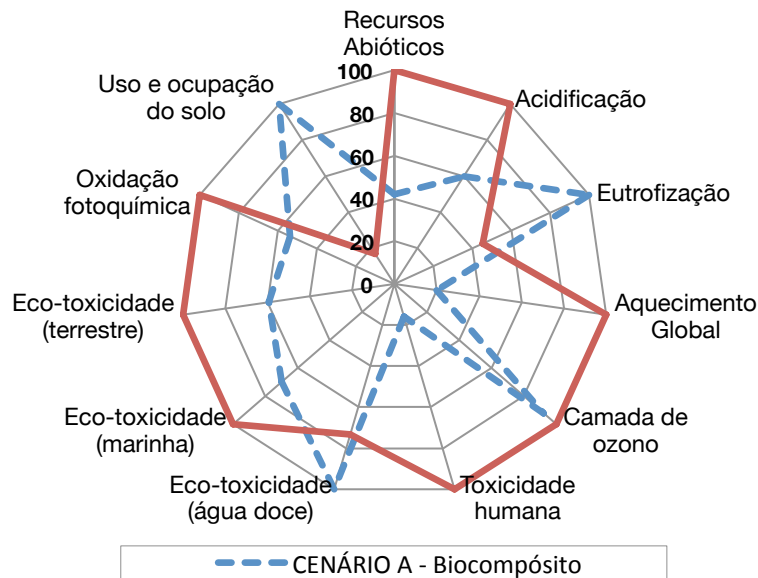


Figura 5.5: Caracterização dos impactos do Cenário A comparativamente com o Cenário B (Tecidos) - valores relativos em percentagem (%).

Comparativamente com o tecido com linho+PLA (Cenário A), a produção de tecido com fibra de vidro+PP (Cenário B) demonstra uma diferença substancial representando impactos ambientais significativamente maiores para a maioria dos indicadores, com exceção dos indicadores de ocupação de terra, eutrofização e eco-toxicidade (água doce). É importante salientar ainda os resultados do indicador de **aquecimento global** no Cenário A (-80,2%), justificados pela influência da fotossíntese nas fases de cultivo (ver também Figura 5.10), e também a depleção de recursos abióticos (-58%) e a toxicidade humana (-84%).

A depleção de recursos abióticos e eco-toxicidade (marinha) continuam a ser os indicadores que representam um maior impacto geral, não obstante, a acidificação, aquecimento global e toxicidade humana representam também um peso expressivo nomeadamente no cenário **B**, tal como se pode observar na Figura 5.6.

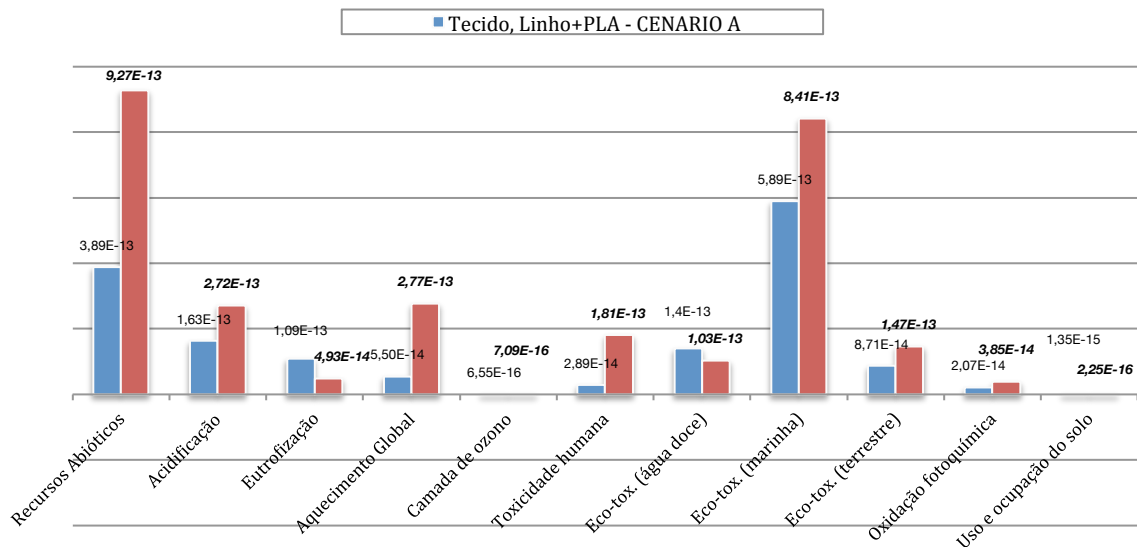


Figura 5.6: Normalização dos resultados dos impactos da produção de Tecido de PLA+Fibras de Linho, comparativamente com Tecido em PP+Fibras de Vidro.

#### Breve comparação entre: fibras de linho e fibras de vidro; PLA, PP, PA 66 e PC

A produção de fibras de vidro conduz a um impacto ambiental significativamente superior às fibras de linho tal como se pode observar através da análise da Figura 5.7. O indicador de **aquecimento global** representa um impacto de -145,4%, justificado uma vez mais pela captura de carbono, resultado da fotossíntese nas fases de cultivo. Já o indicador de uso e ocupação de terra revela-se como a única desvantagem significativa na produção de fibras de linho, mas também a eutrofização, igualmente justificados pela fase de cultivo do linho. As tabelas com dados de caracterização dos impactos encontram-se no Anexo H.

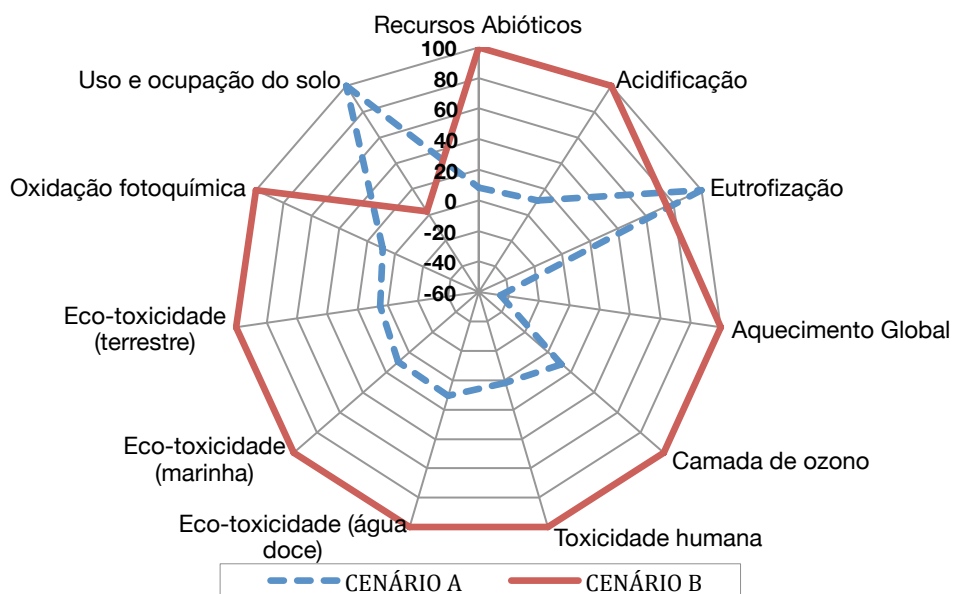


Figura 5.7: Caracterização dos resultados dos impactos da produção de Fibras de Linho comparativamente com Fibras de Vidro. Valores relativos em percentagem (%).

A produção de PP comparativamente com o PLA apresenta vantagens tal como se pode observar através da Figura 5.8. Parte significativa dos indicadores revelam resultados relativos assinaladamente mais baixos, nomeadamente nos indicadores relacionados com a eco-toxicidade, a toxicidade humana, depleção da camada de ozono, uso do solo e eutrofização.

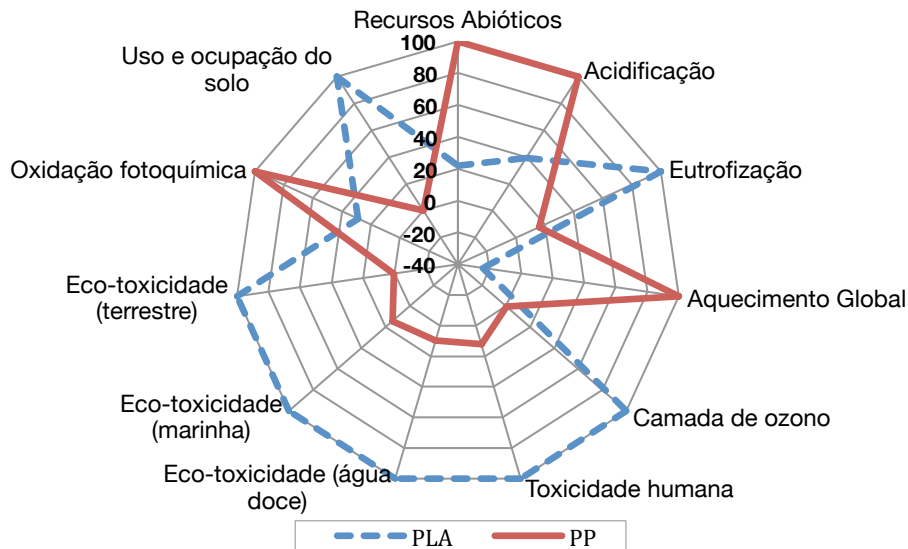


Figura 5.8: Caracterização dos resultados dos impactos da produção de PLA, comparativamente com PP. Valores relativos em percentagem (%).

É importante salientar ainda que o polipropileno apresenta um bom desempenho ambiental comparativamente com outros materiais termoplásticos tal como é possível observar na Figura 5.9. da comparação com PLA, PA 66 e PC. As tabelas com dados de caracterização dos impactos encontram-se no Anexo H.

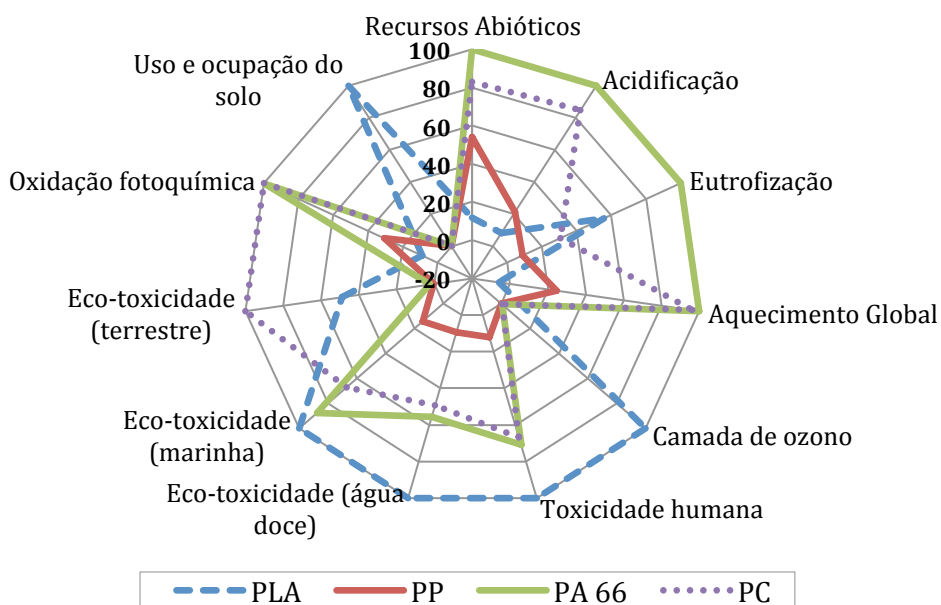


Figura 5.9: Caracterização dos resultados dos impactos da produção de PLA, comparativamente com PP, PA 66 e PC. Valores relativos em percentagem (%).

## Contribuições dos processos

Os **processos e substâncias mais responsáveis pelos impactos**, podem ser observados através dos diagramas de processos (ver Anexo G). Estes diagramas representam nódulos integrantes da vasta rede dos milhares de processos envolvidos, onde é visível uma pequena fração que representa apenas os processos com maior impacto para cada um dos indicadores, sendo interrompidos os fluxos dos processos menos responsáveis. Um destes diagramas pode ser observado na Figura 5.10 (contribuição dos processos envolvidos na produção de tecidos de Linho+PP, Cenário A, para o indicador de Aquecimento Global). Tal como referido atrás, os restantes encontram-se em anexo e referem-se aos processos envolvidos na produção do suporte e também do tecido isoladamente.

Os processos responsáveis são descritos de seguida, por cada categoria de impacto e para cada um dos cenários de referência, considerando o fabrico integral e também a produção dos tecidos isolada do restante sistema.

**Depleção de recursos Abiótico:** no cenário **A**, observa-se que o processo mais responsável é a produção de energia elétrica, e mais especificamente a extração de carvão, mas também de petróleo e extração e transporte de gás natural. Já no cenário **B**, além dos fatores anteriores, soma-se a produção de fibras de vidro, devido à extração de matéria-prima, visto que a sua substância primária é a sílica (principal componente da areia), e também o óxido de cálcio e o óxido de alumínio, obtidos a partir de recursos minerais. Engloba-se também a extração de recursos fósseis na produção de polipropileno e na produção de energia para processamento dos materiais em causa, nomeadamente as fibras de vidro que exigem temperaturas de processamento na ordem dos 1200°C.

**Acidificação:** em ambos os cenários observa-se que a produção de energia elétrica, mais especificamente a combustão e uso do carvão é o processo mais responsável por estes impactos.

**Eutrofização:** no cenário **A**, os processos mais responsáveis são as matérias usadas na produção do biocompósito, mais especificamente os processos de cultivo do Milho, mas também do Linho, devido ao uso de Fertilizantes. A produção de energia elétrica, a partir de carvão, também apresenta um peso importante. No cenário **B**, o processo mais responsável é a produção de energia, essencialmente a partir do carvão.

**Aquecimento Global:** no cenário **A**, consta-se que produção das plantas usadas na produção do biocompósito contribui favoravelmente, devido à captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> por resultado da fotossíntese. Contudo, esse volume de captura não permite anular a quantidade equivalente de CO<sub>2</sub>, emitido sobretudo nos processos de produção de energia elétrica,

essencialmente através de carvão e cogeração a Diesel. No cenário **B**, o processo mais responsável é uma vez mais a produção de energia, principalmente a partir do carvão (ver figura 5.10).

**Destruição da Camada de Ozono:** em ambos os cenários, constata-se que os processos mais responsáveis são a produção de energia elétrica a partir de cogeração a diesel e gás natural, assim como a extração e transporte destes combustíveis.

**Toxicidade Humana:** no cenário **A**, os processos mais responsáveis a distribuição de energia elétrica, o Ferro e Crómio associado à produção de infraestruturas e maquinaria, na fase de produção de milho e na posterior produção do PLA, e também em menor grau as emissões da produção de energia elétrica com carvão.

No cenário **B**, a produção de fibra de vidro representa aproximadamente a totalidade dos impactos devido ao uso de óxido de alumínio, aos resíduos gerados, e também derivado da produção de energia elétrica utilizada.

**Eco-toxicidade aquática (água doce):** no cenário **A**, são principalmente as emissões de metais pesados, nas fases relacionadas com a produção de PLA, mais concretamente, o cultivo do milho, mas também a deposição de resíduos de níquel relacionada com a produção das embalagens. Para além disso, averiguam-se em menor grau as emissões associadas à produção de eletricidade. No cenário **B**, os processos mais responsáveis são produção fibras de vidro e a produção de energia elétrica associada, e ainda a produção de cartão para embalagens.

**Eco-toxicidade aquática marinha:** no cenário **A**, deve-se essencialmente à produção de gás natural, e ao uso de carvão na produção de energia elétrica, à produção do PLA e à deposição de resíduos de níquel relacionados com a produção de cartão para embalagens. Já no cenário **B**, está essencialmente relacionado à produção de gás natural, e ao uso de carvão para produção de energia usada na produção de fibras de vidro, e dos restantes componentes.

**Eco-toxicidade Terrestre:** no cenário **A**, a fase de distribuição de eletricidade, devido às emissões de cobre e outros metais, e também em menor grau, ao cultivo de milho na produção de PLA. No cenário **B** está associado essencialmente à distribuição de energia elétrica.

**Oxidação fotoquímica:** em ambos os cenários, observa-se que os processos mais responsáveis, são as emissões associadas à produção de energia elétrica a partir do carvão e a cogeração a diesel. É de salientar ainda que no cenário **B** observa-se a influência do processo de produção de PP devido à deposição dos resíduos emitidos por este processo.

**Uso e ocupação do solo:** em ambos os cenários, o processo mais responsável é a produção de embalagens em cartão devido à produção de madeira. Salientando o cenário **A**, onde se observa uma notável diferença referente ao biocompósito, que se justifica devido ao cultivo de milho e linho usado na produção de PLA e das fibras, respetivamente.

Constata-se que a produção de energia elétrica com recursos a fontes fósseis não renováveis tem um peso significativo na contribuição da quase totalidade dos impactos. O produto analisado envolve vários materiais e componentes, alguns dos quais requerem grandes quantidades de energia para serem produzidos, como por exemplo as fibras de vidro.

Restringindo o sistema apenas à produção dos tecidos continua-se a constatar que a produção de energia elétrica mantém um peso relativamente importante na generalidade dos indicadores. Além disso, da análise da produção dos tecidos é possível entender a contribuição dos impactos relativos aos processos de produção de PP e também da fibra de vidro na depleção de recursos abióticos. É importante salientar as vantagens da influência da fotossíntese nas fases de cultivo, para o aquecimento global, tal como se pode observar na Figura 5.10 através do diagrama referente aos processos que mais contribuem para o respetivo indicador de aquecimento global (em que o fluxo delineado a verde representa o impacto positivo da captura de CO<sub>2</sub> decorrente da fotossíntese).

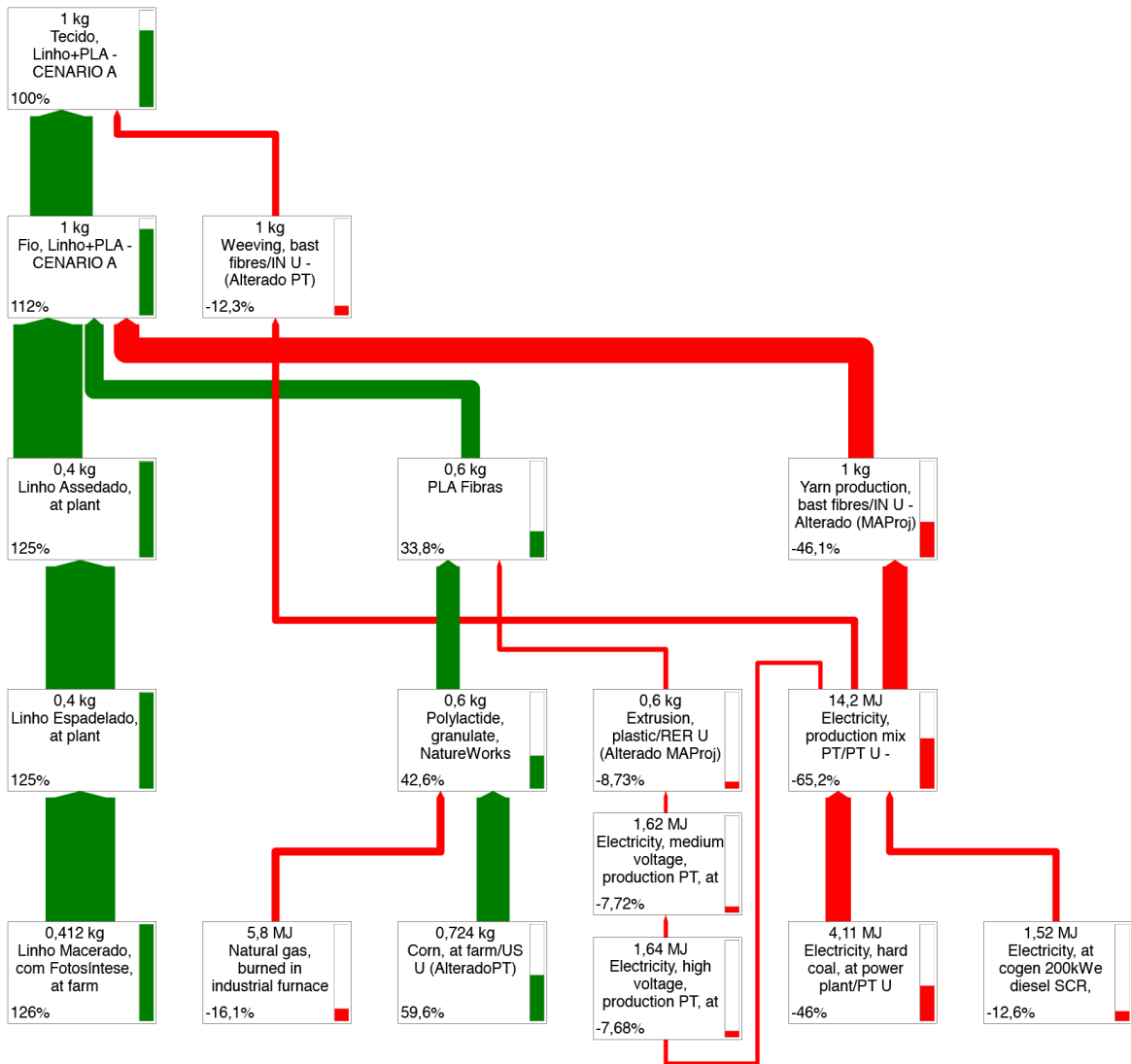


Figura 5.10: Contribuição dos processos envolvidos na produção de tecidos de Linho+PP (Cenário A), para o indicador de Aquecimento Global.

Certifica-se também, com maior detalhe, a grande contribuição da produção de fibras de vidro nos indicadores de toxicidade humana e eco-toxicidade aquática, derivado principalmente do uso e deposição de resíduos do óxido de alumínio e também da contribuição dos altos consumos de energia na sua produção. E para concluir é possível ainda observar que o uso de agrotóxicos na produção de PLA e em menor grau na produção do linho, detém uma grande influência nos indicadores de eco-toxicidade aquática e toxicidade humana. Confirma-se, por fim, o peso significativo do uso e ocupação do solo relacionado com a produção de PLA e Linho.

#### **5.4. Conclusões**

O presente estudo descreve o impacto ambiental associado à produção de um suporte multifuncional de câmara, fabricado com um biocompósito, em comparação com o mesmo produto fabricado com os componentes estruturais fabricados em PRFV.

São expostas as vantagens e desvantagens em termos de impactos ambientais, da aplicação de um termoplástico de PLA reforçado com fibras de linho, comparativamente com PP reforçado com fibras de vidro, a um mesmo produto.

São verificadas maiores vantagens para o produto ao qual foi aplicado um termoplástico de PLA reforçado com fibras de linho, por apresentar resultados mais favoráveis na maioria dos indicadores de categorias de impacto ambiental. Com impactos expressamente menores no indicador de toxicidade humana (-53,3%).

Os resultados sugerem ainda que o uso hipotético de polipropileno como matriz reforçado com fibras de naturais de linho pode constituir vantagens no desempenho ambiental do produto, dado facto de apresentar impactos mais reduzidos em diversas das categorias de impacto.

A análise dos processos que mais contribuem para os impactos relativos em cada um dos indicadores, permitiu observar que a produção de energia elétrica representa um forte impacto na quase totalidade das categorias de impacto. Contudo, restringindo a análise comparativa somente aos tecidos de PLA+Fibras de linho e PP+fibras de vidro e seguidamente através de uma comparação entre as fibras de linho e fibras de vidro, entre o PLA e PP e outros termoplásticos foi possível a obtenção de dados mais detalhados que permitem concluir que:

- O cultivo de milho e linho permite o sequestro de uma quantidade considerável de CO<sub>2</sub>;
- Os indicadores de eutrofização e uso e ocupação de terra mantêm-se altos em todos os processos analisados relativos à produção de PLA e Fibras de Linho, que se justifica essencialmente pelo uso de fertilizantes na fase de cultivo das plantas;

- O indicador de eco-toxicidade (água doce) apresenta-se alto na produção do biocompósito e na produção de PLA, porém significativamente mais baixo na produção de fibras de linho pelo facto de que o cultivo do linho exige quantidades relativamente baixas de agrotóxicos e fertilizantes. Além disso as fibras de vidro apresentam também impactos significativos neste mesmo indicador derivado ao alto consumo de energia associado ao seu processamento, que exige temperaturas na ordem dos 1200°C;
- A produção de fibras de vidro representa um impacto ambiental significativamente superior às fibras de linho. Contudo, o PP apresenta um desempenho ambiental favorável em bastantes categorias de impacto comparativamente com o PLA.

Estratégias para reduzir os impactos ambientais poderiam passar por:

- Melhorar a qualidade do tipo de agrotóxicos e fertilizantes utilizados nos processos de cultivo de plantas de linho e milho para reduzir impactos relacionados com a eutrofização e eco-toxicidade;
- Utilizar polipropileno como matriz, reforçado com fibras naturais de linho, para reduzir impactos relativos com eco-toxicidade e toxicidade humana, apesar de resultar num agravamento significativo na depleção dos recursos abióticos e do aquecimento global.

# 6 Conclusões

---

O presente capítulo reserva-se às conclusões gerais relativas a todo o projeto que inclui não só as principais conclusões relativas à avaliação do ciclo de vida realizada, como também ilações baseadas no desenvolvimento do produto, na comparação dos materiais e nas informações consultadas, sendo ainda indicadas algumas recomendações para trabalhos futuros.

## 6.1. Conclusões sobre o trabalho realizado

No presente projeto avaliou-se os potenciais impactos ambientais derivados do fabrico de um produto (suporte multifuncional de câmara) produzido num biocompósito de matriz polimérica de PLA reforçado com fibras naturais de linho comparativamente com mesmo produto produzido com PP reforçado com fibras de vidro. Este visou entender as vantagens em termos ambientais associadas à aplicação deste tipo de material em componentes estruturais de produtos similares, partindo do princípio de que a matéria-prima e o produto é maioritariamente produzido e fabricado em Portugal continental. Recorreu-se a uma metodologia abrangente que visou o desenvolvimento de um produto baseado em produtos existentes, o seu fabrico e caracterização mecânica do material biocompósito. O objetivo passa por entender as potencialidades do material e as possíveis dificuldades adjacentes aos métodos de fabrico utilizados, com o fim de delinear e garantir uma maior coerência e objetividade na realização da avaliação do ciclo de vida.

A produção de fibras naturais e de compósitos derivados podem contribuir para o desenvolvimento desta indústria em áreas rurais com forte tradição agroflorestal, contribuindo consequentemente para a criação de emprego e como solução para um desenvolvimento sustentável. Estes materiais são promissores em termos de sustentabilidade e, embora a produção de fibras naturais e materiais derivados não resolvam os problemas destas regiões, poderão reduzi-los. A

produção de linho, apesar de ser hoje uma atividade quase abandonada em Portugal, assume uma grande importância em países produtores na Europa. Além das fibras naturais também os biopolímeros como o PLA, produzidos a partir de plantas como por exemplo milho, beterraba, cana de açúcar, trigo, tapioca e celulose podem deter semelhante importância.

O material biocompósito utilizado foi fabricado com um tecido designado comercialmente de *Biotex (Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack, 500g/m<sup>2</sup>)* e produzido pelo método de moldação por compressão a quente. Relativamente ao processo de fabrico, verificou-se que os resultados obtidos segundo os métodos de fabrico, procedimentos e parâmetros utilizados foram bastante satisfatórios. A placa de laminado produzida e utilizada no fabrico dos componentes apresentou uma boa consolidação e compactação, não se observando variações de espessura ou qualquer indício de desintegração. Os resultados do acabamento final da maquinação foram igualmente bastante bons não tendo ocorrido qualquer defeito aparente nos três componentes de biocompósito maquinados. Pode-se então concluir que segundo os métodos utilizados este material não apresenta problemas de maquinação associados.

Apesar de ter sido realizado um estudo de caracterização mecânica do biocompósito produzido, optou-se por utilizar os dados disponibilizados pelo fabricante para comparação com outros compósitos de PP reforçado com fibras de vidro, material que é comparado igualmente na avaliação do ciclo de vida. A opção derivou do facto de que os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados para caracterização mecânica apresentaram-se díspares relativamente aos dados publicados pelo fabricante, sendo que os valores de resistência e rigidez obtidos foram significativamente mais baixos. Observou-se que a placa utilizada no fabrico dos provetes para ensaio apresentava uma evidente falta de consolidação e uma fraca adesão entre as camadas de tecido, verificando-se ainda uma variação da espessura entre o perímetro central e as extremidades da mesma. As possíveis causas são referidas no estudo unicamente como hipóteses.

Esta comparação permitiu concluir que os compósitos produzidos com *Biotex* podem ser uma alternativa viável a alguns compósitos de matriz termoplástica de PP reforçados com fibras de vidro em termos de desempenho mecânico. Numa análise geral, observou-se que os valores dos resultados das tensões máximas são mais altos para a generalidade dos materiais compósitos de PP reforçados com fibras de vidro, contudo possuem módulos de elasticidade equiparáveis, sendo que os resultados de resistência à tração, módulo de flexão e resistência à flexão apresentam valores mais baixos para os laminados produzidos em tecido com padrões de tecelagem bidirecional. Porém esse mesmo tecido (*Biotex Flax/PLA 4x4 Hopsack*), quando comparado com os compósitos de fibras desalinhas moldados por injeção (*Complēt® LGF PP*) demonstram propriedades gerais equiparáveis entre si, o que sugere desempenhos mecânicos similares a uma temperatura ambiente. Salienta-se ainda que existe um melhoramento significativo das propriedades mecânicas dos laminados produzidos em *Biotex* com fibras alinhadas unidirecionalmente.

Relativamente à **avaliação do ciclo de vida** e com base nos resultados, verifica-se que o uso de PLA reforçado com fibras de linho demonstra ser vantajoso para a generalidade das categorias de impactos ambientais comparativamente com o PP reforçado com fibras de vidro. O produto ao qual foi aplicado um termoplástico de PLA reforçado com fibras de linho apresenta resultados mais favoráveis na maioria dos indicadores de categorias de impacto ambiental, com impactos expressamente menores no indicador de toxicidade humana. Além disso, verifica-se que a produção de energia elétrica com recursos a fontes não renováveis, particularmente proveniente da produção com carvão, tem um peso bastante significativo na contribuição da quase totalidade das categorias de impacto no fabrico do produto. Adicionalmente, restringindo a análise comparativa a processos específicos, foi possível obter dados mais detalhados que permitem concluir o seguinte:

- A produção de fibras de vidro representa um impacto ambiental significativamente superior às fibras de linho, contudo o PP apresenta um desempenho ambiental favorável em bastantes categorias de impacto comparativamente com o PLA;

- O cultivo de milho e linho permite o sequestro de uma quantidade considerável de CO<sub>2</sub>;

- A produção de PLA e linho contribuem claramente para uso e ocupação do solo;

- A produção de PLA e linho contribuem claramente para os impactos de eutrofização e uso e ocupação de terra, que se justifica essencialmente pelo fase de cultivo e pelo uso de fertilizantes;

- Os processos de produção de PP e também da fibra de vidro detêm um peso significativo na depleção de recursos abióticos;

- A produção de fibras de vidro contribuem consideravelmente para a toxicidade humana e eco-toxicidade aquática, derivada principalmente do uso e deposição de resíduos do óxido de alumínio e também da contribuição dos elevados consumos de energia na sua produção;

- O uso de agrotóxicos na produção de PLA e em menor grau na produção do linho detêm também uma grande influência nos indicadores de eco-toxicidade aquática e toxicidade humana, sendo que o indicador de eco-toxicidade (água doce) é elevado para a produção do biocompósito e na produção de PLA, porém significativamente mais baixo na produção de fibras de linho isoladamente, pelo facto do cultivo do linho exigir quantidades relativamente baixas de agrotóxicos e fertilizantes.

As estratégias para reduzir os impactos ambientais poderiam passar por melhorar a qualidade do tipo de agrotóxicos e fertilizantes utilizados nos processos de cultivo de plantas de linho e milho como o fim de reduzir os impactos relacionados com a eutrofização e eco-toxicidade. Além disso, os resultados sugerem que a utilização hipotética de PP como matriz, reforçado com fibras de naturais de linho, pode constituir vantagens no desempenho ambiental do produto, uma vez que se observa uma potencial redução dos impactos relativos à eco-toxicidade e toxicidade humana. No entanto, pode resultar num agravamento significativo da depleção dos recursos abióticos e do aquecimento global. Adicionalmente às aparentes vantagens no desempenho ambiental inerentes

ao uso do PP e apesar deste poder ser comparáveis ao PLA em termos de desempenho mecânico, o PLA apresenta uma menor durabilidade e degrada-se com maior facilidade.

Em conclusão, o estudo sugere que a aplicação de fibras naturais em produtos com característica similares poderá, por si só, ser uma vantagem por forma a assegurar a preservação ambiental e uma alternativa para o sucesso de um desenvolvimento sustentável.

No que respeita à utilização do biopolímero PLA as vantagens relacionadas com a fácil degradação pode ser considerada uma vantagem, porém comparativamente com o PP o desempenho ambiental do PLA não apresenta vantagens na maioria das categorias de impacto analisadas.

No respeitante à ACV é fundamental considerar as suas limitações, pois apesar de proporcionar dados relevantes enquanto ferramenta analítica, os resultados não deverão ser assumidos como definitivos e sim como uma base complementar de apoio à decisão, ou com vista à otimização de processos.

## **6.2. Recomendações para trabalhos futuros**

Considerando os dados recolhidos ao longo do presente projeto, assim como os respetivos resultados, recomenda-se que em trabalhos futuros se considere:

- Uma expansão de sistema ao invés do método de alocação em massa na ACV, permitindo assim obter dados sobre a influência nos impactos ambientais dos coprodutos gerados. Nomeadamente, como exemplo, ao nível da quantidade significativa de coprodutos gerados pela produção de fibras de linho, os quais poderão ser convertidos em energia;

- A avaliação dos dados obtidos na ACV, recorrendo a metodologias correntes que permitam uma interpretação e categorização normalizada, tal como as regras para a categoria de produto;

- A viabilidade da sustentabilidade económica para compreender o potencial da produção de materiais compósitos reforçados com fibras de linho em Portugal, e de produtos do mesmo género como o que é aqui abordado, e entender se o desenvolvimento deste tipo de indústria poderia, ou não, ser uma alternativa viável para contribuir para um desenvolvimento sustentável. Contudo, para se estudar a sustentabilidade desse desenvolvimento será necessário considerar outros fatores adicionais e não apenas o fator de proteção ambiental, tratado com recurso a ferramentas como a ACV, como foi aplicada neste estudo. Seria nesse caso indispensável a realização de estudos de âmbito mais alargado, que considerem a viabilidade dos fatores económicos e sociais, dado que a ACV incide nos aspetos ambientais dos produtos e não se reserva a uma avaliação abrangente das dimensões económicas ou sociais.

## Bibliografia

---

- [1] FERRÃO, Paulo - **Ecologia Industrial: Princípios e Ferramentas**. Coleção ensino da ciência e tecnologia. IST PRESS, 2009. ISBN 978-972-8469-79-5.
- [2] FARUK, Omar; BLEDZKI, Andrzej; FINK, Hans; SAIN, Mohini - **Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010**. Progress in Polymer Science. Vol. 37, Issue 11 (2012), p.1552-1596.
- [3] DITTENBER, David B.; GANGARAO, Hota V.S. - **Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure**. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. Vol. 43, no. 8 (2012), p.1419-1429.
- [4] MÜSSIG, Jörg (Ed) - **Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications**. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0-470-69501-1.
- [5] FAO statistics. [Em linha]. [Consult. Jan. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://faostat3.fao.org/home/E>>.
- [6] FAO GAEZ Global Agro-Ecological Zones. [Em linha]. [Consult. Jan. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://gaez.fao.org/Main.html#> >.
- [7] SHRUM, L. J.; LOWREY, T. M; MCCARTY, J. A - **Recycling as a marketing problem: A framework for strategy development**. Psychology & Marketing. Vol. 11, Issue 4 (1994), p.393-416.
- [8] The story of the Club of Rome. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.clubofrome.org/>>.
- [9] United Nations Global Issues. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.un.org/en/globalissues/environment/links.shtml> >.
- [10] World Conservation Strategy - Living Resource Conservation for Sustainable Development IUCN-UNEP-WWF, 1980. ISBN 2-88032-104-2.
- [11] Report of the World Commission on Environment and Development:Our Common Future. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>>.
- [12] Earth Summit. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.earthsummit.info> >.
- [13] Agenda 21. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/agenda21.htm>>.
- [14] Commission on Sustainable Development (CSD). [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/csd.html> >.
- [15] Kyoto Protocol. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL: [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/2830.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php)>.

- [16] Kyoto Protocol to the UNFCCC [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: [http://unfccc.int/essential\\_background/kyoto\\_protocol/items/1678.php](http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/items/1678.php) >.
- [17] Rio+20 Conference. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.uncsd2012.org/about.html> >.
- [18] High-level Political Forum on Sustainable Development. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?menu=1556> >.
- [19] COP21 [Em linha]. [Consult. Ago. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.cop21paris.org/about/cop21> >.
- [20] International Year of Natural Fibres. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.naturalfibres2009.org/en/index.html> >.
- [21] CALLISTER, William; RETHWISCH, David - **Materials science and engineering: an introduction**. 7th ed. John Wiley & Sons Inc, 2007. ISBN: 9780471736967.
- [22] VAN RIJSWIJK, Kjelt; BROUWER, W.; BEUKERS, A. - **Application of Natural Fibre Composites in the Development of Rural Societies**. FAO corporate document repository. 2003. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.fao.org/docrep/007/ad416e/ad416e00.htm>>.
- [23] ALVES, C. [et. al.] - **Ecodesign of Automotive Components Making Use of Natural Jute Fiber Composites**. Journal of Cleaner Production. Vol. 18, no. 4 (2010), p.313-27.
- [24] VILAPLANA, Francisco, STRÖMBERG, Emma; KARLSSON, Sigbritt - **Environmental and Resource Aspects of Sustainable Biocomposites**. Polymer Degradation and Stability. Vol. 95, no. 11 (2010), p2147-2161.
- [25] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements. Official Journal L285, 31.10.2009, p.10-35.
- [26] ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Standard Organization, 2006.
- [27] Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN: 1-4020-0228-9.
- [28] Simapro. [Em linha]. [Consult. Mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.pre-sustainability.com/simapro>>.
- [29] GaBI. [Em linha]. [Consult. Mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.gabi-software.com/international/index/> >.
- [30] OpenLCA. [Em linha]. [Consult. Mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.openlca.org> >.
- [31] ELCD. [Em linha]. [Consult. Mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu> >.
- [32] Ecoinvent Databases. [Em linha]. [Consult. Mai. 2014]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.ecoinvent.org/database/> >.
- [33] ASHBY, Michael; JONES, David - **Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design**. 3<sup>rd</sup> revised ed. Pergamon Press, 2005. ISBN 978-075066381.
- [34] Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicles - Commission Statements. Official Journal L 269, 21/10/2000 p.0034-0043.
- [35] OSSWALD, Tim - **Polymer Processing Fundamentals**. Hanser Publishers, 1998. ISBN 978-1569902622.
- [36] BUDINSKI, Kenneth; BUDINSKI, Michael - **Engineering Materials: Properties and**

- Selection.** 9th ed. Prentice Hall, 2009. ISBN: 978-0137128426.
- [37] KAPLAN, David - **Biopolymers from renewable resources.** Springer-Verlag, 1998. ISBN 3-540-63567-X.
- [38] Polylactic Acid (PLA) Typical Properties. [Em linha]. [Consult. Out. 2015]. Disponível em WWW:<URL: <http://plastics.ulprospector.com/generics/34/polylactic-acid-pla> >.
- [39] **Review of the U.S. Navy's Exposure Standard for Manufactured Vitreous Fibers.** National Academies Press, 2001. ISBN: 978-0-309-07376-9.
- [40] WAMBUA, Paul; IVENS, Jan; VERPOEST, Ignaas - **Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?** Composites Science and Technology. Vol. 63, Issue 9 (2003), p.1259-1264.
- [41] MARINUSSEN, M [et. al.] - **LCI data for the calculation tool Feedprint for greenhouse gas emissions of feed production and utilization: Cultivation oil seeds and oil fruits.** Blonk Consultants, Wageningen University and Research Centre, November 2012. Disponível em: <http://blonkconsultants.nl/upload/pdf/PDV%20rapporten/Cultivation%20oil%20seeds>.
- [42] Natural fibres help build green economy. [Em linha]. [Consult. Jun. 2015]. Disponível em WWW: <URL: [http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/achievements/highlights/2009/natural\\_fibres.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/achievements/highlights/2009/natural_fibres.html) >.
- [43] Growing Flax – Production, Management & Diagnostic Guide. [Em linha]. [Consult. Jun. 2015]. Disponível em WWW:<URL: <http://flaxcouncil.ca/growing-flax/flax-straw-and-fibre/> >.
- [44] SUMMERSCALES, John [et. al.] - **A Review of bast Fibres and their Composites. Part 1 - fibres as reinforcements.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. Vol.41, Issue 10 (2010) p.1329-1335.
- [45] DISSANAYAKE, Nilmini [et. al.] - **Optimisation of Energy Use in the Production of Flax Fibre as Reinforcement for Composites.** In: International Conference on Flax and Other Bast Plants, Saskatoon, Canada 21-23 July [S.l.]:[s.n.], 2008.
- [46] Linen transformation steps. [Em linha]. [Consult. Jun. 2015]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.mastersoflinen.com/eng/lin/8-de-la-graine-a-la-fibre> >.
- [47] The fabric of the future made from forgotten plant fibers. [Em linha]. [Consult. Jun. 2015]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.freitag.ch/media/fabric/fromfiberstofabric#> >.
- [48] ASHBY, Michael - **Material Selection in Mechanical Design.** 3rd ed. Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0750661682.
- [49] SCHEIRS, John - **Polymer Recycling: Science, Technology and Applications.** Willey, 2001. ISBN 0471970549.
- [50] Environmental Certificate Mercedes-Benz S-Class. [Em linha]. [Consult. X Jan. 2015]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.cms.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/> >.
- [51] Vaneko. [Em linha]. [Consult. Mai. 2015]. Disponível em WWW:<URL: <http://vaneko.com/>>.
- [52] Blackbird El Capitan [Em linha]. [Consult. Jan. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <https://blackbirdguitar.com/>>.
- [53] Stemergy Renewable Bio Fiber Products. [Em linha]. [Consult. Jan. 2015]. Disponível em WWW:<URL: <http://www.stemergy.com/products/flaxfibre/flaxfibercomposites/> >.
- [54] Gas receiving station. [Em linha]. [Consult. Jan. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://marcovermeulen.eu/projects/key/122/gasreceivingstation/english/>>.
- [55] HOFFMAN, Peter; HOPEWELL, Eric; JANES, Brian - **Precision Machining Technology.** 2nd Edition. Delmar Cengage Learning, 2014. ISBN 978-1285444543.

- [56] KELLY, Anthony (Ed) - **Concise Encyclopedia of Composite Materials: Advances in Materials Sciences and Engineering**. Revised Ed. Pergamon Press, 1994. ISBN: 978-0080423005.
- [57] BRANDRUP, Johannes [et. al.] - **Recycling and Recovery of Plastics**. Hanser Gardner Publications, 1996. ISBN 1569902143.
- [58] YANG, Yongxiang [et. al.] - **Recycling of composite materials**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. Vol. 51 (2011). p53-68.
- [59] JOHN, Maya Jacob; THOMAS, Sabu - **Biofibres and biocomposites**. Carbohydrate Polymers. Vol. 71, Issue 3 (2008), p.343-364.
- [60] SHEN L.; HAUFE J.; PATEL M. - **Product overview and market projection of emerging bio-based plastics**. PRO-BIP 2009, Final. Utrecht University, 2009. Disponível em: [http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/03/publications/PROBIP2009\\_Final\\_June\\_2009.pdf](http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/03/publications/PROBIP2009_Final_June_2009.pdf).
- [61] Cinevate. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.cinevate.com>>.
- [62] Edelkrone. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <https://www.edelkrone.com> >.
- [63] Konova. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://konovaphoto.com> >.
- [64] Rhino. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://rhinocameragear.com> >.
- [65] Skier. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.skier.com.tw>>.
- [66] Varavon. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://varavon.com> >.
- [67] ROMÃO, Cristina - **Compósitos de matriz termoplástica de baixa viscosidade reforçados com fibras naturais de origem vegetal**. Universidade do Porto (F.E.U.P.), Portugal, 2012. Tese de doutoramento.
- [68] Biotex. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.compositesevolution.com/Products/Biotex.aspx> >.
- [69] ISO 14125:1998, Fibre reinforced plastic composites - Determination of flexural properties. International Standard Organization, 1998.
- [70] ISO 527-1:1996, Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles, 1996. International Standard Organization, 1996.
- [71] ISO 527-4:1997, Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites, International Standard Organization, 1997.
- [72] Biotex Flax PLA. [Em linha]. [Consult. Jan. 2014]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.compositesevolution.com/Products/Biotex/BiotexFlaxPLA.aspx> >.
- [73] THERMOPREG WRt-0750-PP60B. [Em linha]. [Consult. Jul. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.ocvreinforcements.com/solutions/Thermopreg.aspx> >.
- [74] TWINTEX T PP. [Em linha]. [Consult. Jul. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://fiberglassindustries.com/glasspolyprotechdata.htm> >.
- [75] Complêt LGF PP 30. [Em linha]. [Consult. Jul. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.plasticomp.com/complet-lgf30-pp/> >.
- [76] Complêt LGF PP 60. [Em linha]. [Consult. Jul. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.plasticomp.com/complet-lgf60-pp/> >.
- [77] Origem da energia - Empresas. [Em linha]. [Consult. Mai. 2015]. Disponível em WWW: <URL: <https://energia.edp.pt/empresas/apoio-ao-cliente/origem-da-energia-negocios/2014.aspx>>.

- [78] Renováveis - Estatísticas Rápidas. [Em linha]. [Consult. 05/2015]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.dgeg.pt>>.
- [79] DUGOU, Antoine; DAVIES, Peter; BAILEY, Christophe - **Environmental Impact Analysis of the Production of Flax Fibres to be Used as Composite Material Reinforcement**. Journal of Biobased Materials and Bioenergy. Vol. 5 (2011), p.1-13.
- [80] LABOUZE, E.; LE GUERN, Y.; PETIOT, C. - **Rapport\_ACV - Analyse de Cycle de Vie comparée d'une chemise en lin et d'une chemise en coton**. Organizations professionnelles du lin, Bio Intelligence Service. Décembre 2007.
- [81] TURUNEN, L.; VAN DER WERF, H. - **Life cycle analysis of hemp textile yarn: Comparison of three hemp fibre processing scenarios and a flax scenario**. French National Institute for Agronomy Research. May 2006.



# Anexos

---



## **Anexo A**

### **Características dos produtos em análise**

Características gerais dos componentes que constituem o produto:

Componente	Material	Peso	Cenário
5 Componentes estruturais	Biocompósito	320,68 gr	A
5 Componentes estruturais	PRFV	≈ 344,37 gr	B
<b>3 Apertadores</b>	<b>PA 66</b>	<b>7,02gr (3*2,34)</b>	A+B
<b>4 Anilha de Contato</b>	<b>PA 66</b>	<b>4,40gr (4*1,10)</b>	A+B
<b>2 Pratos de suporte</b>	<b>PA 66</b>	<b>30,4gr (2*15,2)</b>	A+B
	<b>PA 66 Total</b>	<b>41,82gr</b>	
4 Parafusos Normalizados	Liga de aço	Não considerado	Não considerado

Peso geral dos produtos para cada cenário:

Suporte	Cenário	Componentes Estruturais	Componentes PA 66	Peso Total
Biocompósito	A	320,68 gr	41,82gr	<b>362,5gr</b>
PRFV	B	344,37 gr	41,82gr	<b>386,19gr</b>

Propriedades físicas gerais dos componentes estruturais fabricados com biocompósito:

	Massa	Volume	Densidade
<b>Comp. estrutural A</b> (2 rasos, 1 fundo)	75,80 g	57,006 cm <sup>3</sup>	1,330 g/cm <sup>3</sup>
<b>Comp. estrutural B</b> (3 rasos)	79,50 g	59,783 cm <sup>3</sup>	1,330 g/cm <sup>3</sup>
<b>Comp. estrutural C</b> (sem furos na extremidade)	81,50 g	61,297 cm <sup>3</sup>	1,330 g/cm <sup>3</sup>
<b>Comp. estrutural D</b> (Pontas)	41,94 g	31,537 cm <sup>3</sup>	1,330 g/cm <sup>3</sup>
<b>Placa de Biocomp.</b> (1250 x 740)	12300 g	9250 cm <sup>3</sup>	1,330 g/cm <sup>3</sup>

Propriedades físicas gerais dos componentes estruturais fabricados com PRFV:

	F.Vidro (40%)	PP (60%)	Massa Total
<b>Comp. estrutural A</b> (2 rasos, 1 fundo)	124,3 (49,72)	51,25 (30,75)	<b>80,47 g</b>
<b>Comp. estrutural B</b> (3 rasos)	130,4 (52,16)	54 (32,4)	<b>84,56 g</b>
<b>Comp. estrutural C</b> (sem furos na extremidade)	133,7 (53,48)	55,1 (33,06)	<b>86,54 g</b>
<b>Comp. estrutural D</b> (Pontas)	68,6 (27,44)	31,6 (18,96)	<b>46,4 g</b>

## **Anexo B**

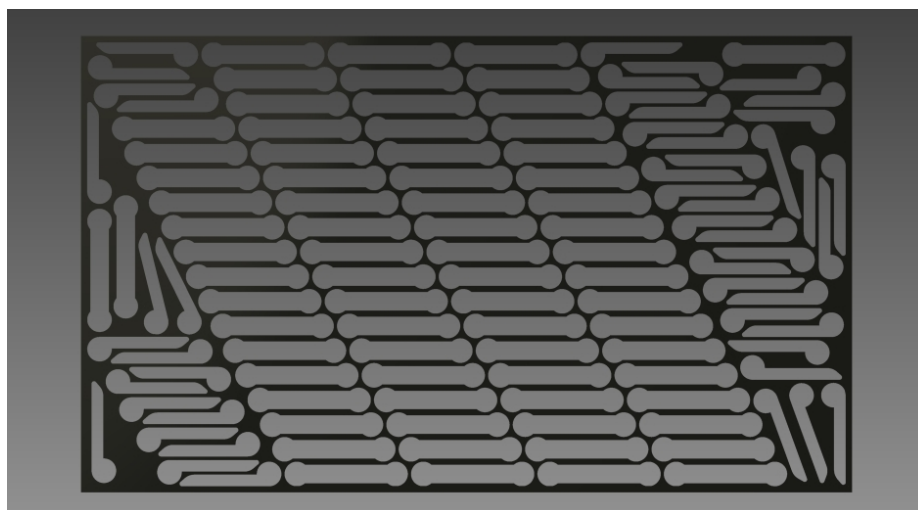
**Otimização do processo de corte do laminado**

A otimização do processo de corte da placa de laminado foi efetuada recorrendo a modelação assistida por computador. O padrão de corte definido obedece às restrições definidas, como por exemplo, o volume ocupado pelas ferramentas de maquinação (espaço entre cada componente) e a distância definida em redor da placa para evitar os eventuais defeitos de processamento que possam existir nas extremidades da mesma.

Num contexto de fabrico à escala industrial os aspetos de otimização poderiam ser melhorados recorrendo a métodos matemáticos com a implementação de algoritmos heurísticos com o fim de reduzir o desperdício no corte e maquinação da placa.

As dimensões definidas para o laminado são de 1250mm x 740mm x 10mm. Apesar desta dimensão ser de difícil processamento representa apenas uma simulação para estimar uma quantidade de desperdício numa situação hipotética. Com esta espessura e restantes dimensões a transferência de calor poderia resultar em defeitos imprevisíveis e até mesmo queimar as fibras na camada exterior pelo que a definição do tamanho da placa num contexto real carece de estudo e experiências prévias.

Na figura seguinte pode observar-se a representação gráfica da modelação em CAD 3D do esquema de corte da placa com as dimensões mencionadas acima e com o número de componentes suficientes para fabricar **24 suportes**. Correspondente a 72 Componentes estruturais (3\*A, 3\* B, 3\*C) e 48 (+1) Componentes D.



*Figura: Representação gráfica da modelação em CAD 3D do esquema de corte da placa.*

#### **Definição do volume de desperdício da placa de laminado de biocompósito:**

Peso da placa de laminado: **12300gr**

Peso total dos componentes maquinados em compósito (por suporte): **320,68 g**

$$320,68 * 24 = 7696,32 \text{gr}$$

$12300 - 7696,32 = 4603,68 \text{ g}$  de desperdício (191,82gr de desperdício por cada suporte)

$$4603,68 * 100 / 12300 = 37,42 \% \text{ (Desperdício)}$$

## **Anexo C**

**Relatórios de recolhas de dados para a ACV**

### Folha 1/5

Recolha de dados para caracterização dos consumos energéticos do processo de maquinação do Componente Estrutural A.

#### Dados para os balanços de energia

Operação	Tempo	Potência	Mudança de ferramenta	Potência	Observações
1	0:00:60	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste estrutura
2	0:04:38	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Contorno
3	0:01:43	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento paredes
4	0:00:32	1,75 kW			Acabamento horizontal
5	0:05:32	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento linear
6	0:07:03	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste 2 parte
7	0:03:05	1,75 kW			Acabamento das paredes_1
8	0:00:43	1,75 kW			Acabamento do fundo
9	0:05:15	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Raios
<b>Total</b>	<b>0:29:30</b>	0,49(h)*1,75 = <b>0,858 kW.h</b>	<b>0:02:00</b>	0,033(h)*1,1 = <b>0,036 kW.h</b>	<b>0,894 kW.h</b>

#### Notas:

- Não se consideraram os reposicionamentos manuais do componente na CNC, pois este poderá variar bastante no processo de industrialização conforme o número de peças a produzir, considerando-se pouco significativo.
- Não se consideraram os picos de corrente nos 6 arranques do *Spindle*.

#### Informação adicional:

Dados recolhidos no momento da maquinação do protótipo, num Centro de Maquinação CNC: *Cincinnati A1000*.

O centro de maquinação está ligada a um **sistema trifásico**, com a diferença de potencial de **400v**. Possui um **transformador à entrada** para 250v. E usa **energia da rede de baixa tensão**.

Mediu-se a tensão e a corrente, usando um Analisador de Energia: *Hioki 3196 Power Quality Analyzer*.

Em cada **uma das fases mediu-se a seguinte potencia/corrente instantânea:**

Fase 1: 7,6A; Fase 2: 6,3A; Fase 3: 5,3A.

A velocidade do *Spindle* foi programado para 6250 rpm (110%).

Valores constantes na ordem dos:

- 1,1Kw na mudança de ferramenta.

- 0,8Kw quando está completamente parada.

- Valor médio 1,75 kW (entre 1,7 kW a 1,8 kW) com o *Spindle* a 6250rpm.

- Valor médio 1,55 kW (entre 1,5 kW a 1,6 kW) com o *Spindle* a 5000rpm

- Atinge picos de corrente na ordem do 21 kW, quando o se inicia o programa de maquinação).

## Folha 2/5

Recolha de dados para caracterização dos consumos energéticos do processo de maquinação do Componente Estrutural B.

### Dados para os balanços de energia

Operação	Tempo	Potência	Mudança de ferramenta	Potência	Observações
1	0:00:60	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste estrutura
2	0:04:38	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Contorno
3	0:01:43	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento paredes
4	0:00:32	1,75 kW			Acabamento horizontal
5	0:05:58	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento linear
6	0:07:03	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste 2 parte
7	0:03:05	1,75 kW			Acabamento das paredes_1
8	0:00:43	1,75 kW			Acabamento do fundo
9	0:04:02	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Raios
<b>Total</b>	<b>0:28:43</b>	$0,479(\text{h}) \cdot 1,75 =$ <b>0,838 kW.h</b>	<b>0:02:00</b>	$0,033(\text{h}) \cdot 1,1 =$ <b>0,036 kW.h</b>	<b>0,874 kW.h</b>

#### Notas:

- Não se consideraram os reposicionamentos manuais do componente na CNC, pois este poderá variar bastante no processo de industrialização conforme o número de peças a produzir, considerando-se pouco significativo.
- Não se consideraram os picos de corrente nos 6 arranques do *Spindle*.

#### Informação adicional:

Dados recolhidos no momento da maquinação do protótipo, num Centro de Maquinação CNC: *Cincinnati A1000*.

O centro de maquinação está ligada a um **sistema trifásico**, com a diferença de potencial de **400v**. Possui um **transformador à entrada** para 250v. E usa **energia da rede de baixa tensão**.

Mediu-se a tensão e a corrente, usando um Analisador de Energia: *Hioki 3196 Power Quality Analyzer*.

Em cada **uma das fases mediu-se a seguinte potencia/corrente instantânea:**

Fase 1: 7,6A; Fase 2: 6,3A; Fase 3: 5,3A.

A velocidade do *Spindle* foi programado para 6250 rpm (110%).

Valores constantes na ordem dos:

- 1,1Kw na mudança de ferramenta.
- 0,8Kw quando está completamente parada.
- Valor médio 1,75 kW (entre 1,7 kW a 1,8 kW) com o *Spindle* a 6250rpm.
- Valor médio 1,55 kW (entre 1,5 kW a 1,6 kW) com o *Spindle* a 5000rpm
- Atinge picos de corrente na ordem do 21 kW, quando o se inicia o programa de maquinação).

### Folha 3/5

Recolha de dados para caracterização dos consumos energéticos do processo de maquinação do Componente Estrutural B.

#### Dados para os balanços de energia

Operação	Tempo	Potência	Mudança de ferramenta	Potência	Observações
1	0:00:60	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste estrutura
2	0:04:38	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Contorno
3	0:01:43	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento paredes
4	0:00:32	1,75 kW			Acabamento horizontal
5	0:05:15	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento linear
6	0:07:03	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste 2 parte
7	0:03:05	1,75 kW			Acabamento das paredes_1
8	0:00:43	1,75 kW			Acabamento do fundo
9	0:03:22	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Raios
<b>Total</b>	<b>0:28:03</b>	$0,468(\text{h}) \cdot 1,75 =$ <b>0,819 kW.h</b>	<b>0:02:00</b>	$0,033(\text{h}) \cdot 1,1 =$ <b>0,036 kW.h</b>	<b>0,855 kW.h</b>

#### Notas:

- Não se consideraram os reposicionamentos manuais do componente na CNC, pois este poderá variar bastante no processo de industrialização conforme o número de peças a produzir, considerando-se pouco significativo.
- Não se consideraram os picos de corrente nos 6 arranques do *Spindle*.

#### Informação adicional:

Dados recolhidos no momento da maquinação do protótipo, num Centro de Maquinação CNC: *Cincinnati A1000*.

O centro de maquinação está ligada a um **sistema trifásico**, com a diferença de potencial de **400v**. Possui um **transformador à entrada** para 250v. E usa **energia da rede de baixa tensão**.

Mediu-se a tensão e a corrente, usando um Analisador de Energia: *Hioki 3196 Power Quality Analyzer*.

Em cada **uma das fases mediu-se a seguinte potencia/corrente instantânea:**

Fase 1: 7,6A; Fase 2: 6,3A; Fase 3: 5,3A.

A velocidade do *Spindle* foi programado para 6250 rpm (110%).

Valores constantes na ordem dos:

- 1,1Kw na mudança de ferramenta.

- 0,8Kw quando está completamente parada.

- Valor médio 1,75 kW (entre 1,7 kW a 1,8 kW) com o *Spindle* a 6250rpm.

- Valor médio 1,55 kW (entre 1,5 kW a 1,6 kW) com o *Spindle* a 5000rpm

- Atinge picos de corrente na ordem do 21 kW, quando o se inicia o programa de maquinação).

## Folha 4/5

Recolha de dados para caracterização dos consumos energéticos do processo de maquinação do Componente Estrutural D.

### Dados para os balanços de energia

Operação	Tempo	Potência	Mudança de ferramenta	Potência	Observações
1	0:00:58	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste estrutura
2	0:03:10	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Contorno
3	0:01:12	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento paredes
4	0:00:32	1,75 kW			Acabamento horizontal
5	0:04:03	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Acabamento linear
6	0:04:50	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Desbaste 2 parte
7	0:02:10	1,75 kW			Acabamento das paredes_1
8	0:00:60	1,75 kW			Acabamento do fundo
9	0:04:08	1,75 kW	0:00:20	1,1 kW	Raios
<b>Total</b>	<b>0:22:02</b>	$0,367(\text{h}) \cdot 1,75 =$ <b>0,642 kW.h</b>	<b>0:02:00</b>	$0,033(\text{h}) \cdot 1,1 =$ <b>0,036 kW.h</b>	<b>0,678 kW.h</b>

#### Notas:

- Não se consideraram os reposicionamentos manuais do componente na CNC, pois este poderá variar bastante no processo de industrialização conforme o número de peças a produzir, considerando-se pouco significativo.
- Não se consideraram os picos de corrente nos 6 arranques do *Spindle*.

#### Informação adicional:

Dados recolhidos no momento da maquinação do protótipo, num Centro de Maquinação CNC: *Cincinnati A1000*.

O centro de maquinação está ligada a um **sistema trifásico**, com a diferença de potencial de **400v**. Possui um **transformador à entrada** para 250v. E usa **energia da rede de baixa tensão**.

Mediu-se a tensão e a corrente, usando um Analisador de Energia: *Hioki 3196 Power Quality Analyzer*.

Em cada **uma das fases mediu-se a seguinte potencia/corrente instantânea:**

Fase 1: 7,6A; Fase 2: 6,3A; Fase 3: 5,3A.

A velocidade do *Spindle* foi programado para 6250 rpm (110%).

Valores constantes na ordem dos:

- 1,1Kw na mudança de ferramenta.

- 0,8Kw quando está completamente parada.

- Valor médio 1,75 kW (entre 1,7 kW a 1,8 kW) com o *Spindle* a 6250rpm.

- Valor médio 1,55 kW (entre 1,5 kW a 1,6 kW) com o *Spindle* a 5000rpm

- Atinge picos de corrente na ordem do 21 kW, quando o se inicia o programa de maquinação).



## **Anexo D**

**Cálculo do consumo de energia – Maquinação CNC (1 suporte)**

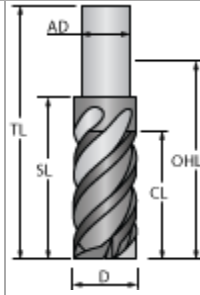
		<b>Consumo de energia</b>
<b>1x Comp. estrutural A</b> (2 rasos, 1 fundo)		0,894 kW.h
<b>1x Comp. estrutural B</b> (3 rasos)		0,874 kW.h
<b>1x Comp. estrutural C</b> (sem furos na extremidade)		0,855 kW.h
<b>2x Comp. estrutural D</b> (Pontas)		1,356 kW.h (2*0,678)
	<b>TOTAL</b>	<b>3,979 kW.h</b>

## **Anexo E**

**Tabela de ferramentas utilizadas na maquinação CNC**

### 10-Spindle-1

END MILL



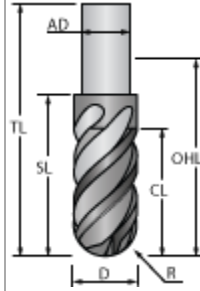
D: 4 mm  
AD: 4

TL: 80 mm  
OHL: 60 mm  
CL: 24 mm  
SL: 30 mm  
H: 100 mm

### 12-Spindle-

1 BT40 ER 40x80

BALL NOSE MILL



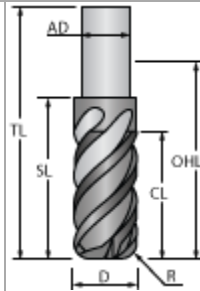
D: 3 mm  
R: 1.5 mm  
AD: 6

TL: 80 mm  
OHL: 60 mm  
CL: 10 mm  
SL: 30 mm  
H: 143 mm

### 14-Spindle-

1 BT40 ER 40x80

BULL NOSE MILL



D: 2 mm  
R: 0.2 mm  
AD: 2

TL: 80 mm  
OHL: 28 mm  
CL: 24 mm  
SL: 26 mm  
H: 111 mm

**Anexo F**  
**Inventário da ACV**



Inventário para a cultivo de linho (1 hectare) - com fotosíntese				Agricultural / Plant Production	Módulo criado: Linho Macerado com Fotossíntese, at farm	
ENTRADAS (Processos / Materiais / Recursos)	Valor	Unid.	Ref.	Notas	Módulo usado	Base de dados
<b>Fertilizantes</b>						
Calcário Agrícola	666	Kg	[81]		Lime, from carbonation, at regional storehouse/CH U	Ecoinvent 2
Fertilizante (N) Nitrato de Amónio	121,2	Kg	[81]		Ammonium nitrate, as N, at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2
Fertilizante (P) Superfosfato Triplo	64,8	Kg	[81]		Triple superphosphate, as P2O5, at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2
Fertilizante (K) Cloreto de Potássio	100,2	Kg	[81]		Potassium chloride, as K2O, at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2
<b>Pesticidas (Produção de)</b>						
(Fungicidas, Herbicidas, Insecticidas)	2,58	Kg	[81]		----- Pesticide unspecified, at regional storehouse/RER U	Ecoinvent 2
<b>Maquinaria Agrícola (Preparação do solo, Tratamentos, Colheita, Maceração e afins)</b>						
Roçagem / Aragem	2	ha	[79], [81]		Tillage, ploughing/CH U	Ecoinvent 2
Lavragem	1	ha	[79]		Tillage, rotary cultivator/CH U	Ecoinvent 2
Gradagem	1	ha	[79]		Tillage, harrowing, by rotary harrow/CH U	Ecoinvent 2
Semeação	1	ha	[79]		Sowing/CH U	Ecoinvent 2
Passagens para Fertilização e Calagem	3	ha	[79], [81]	1 para N; 1 para P e K, e 1 para a Calagem	Fertilising, by broadcaster/CH U	Ecoinvent 2
Aplicação de Pesticidas	5.5	ha	[79]		Application of plant protection products, by field sprayer/CH U	Ecoinvent 2
Arrancamento	1	ha	[79]		Swath, by rotary windrower/CH U	Ecoinvent 2
Volver linho durante a maceração por orvalho	2	ha	[79]		Haying, by rotary tedder/CH U	Ecoinvent 2
Colheita por auto reboque de carga	1	ha	[79]		Fodder loading, by self-loading trailer/CH U	Ecoinvent 2
<b>Outros</b>						
Sementes	115	Kg	[80], [81]		-----	-----
CO2	10973	Kg	[79]		Carbon Dioxide, in Air	-----
Terreno agrícola	1	ha/ano	[80], [81]		Occupation, arable	Ecoinvent 2
<b>SAÍDAS (Produtos / Co-produtos / Emissões)</b>						
SAÍDAS (Produtos / Co-produtos / Emissões)	Valor	Unid.	Ref.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
<b>Produtos</b>						
Linho Macerado (Hastes de linho maceradas)	6650	Kg	[80]	Com 7500 Kg de hastes de linho verde secas		-----
<b>Emissões diretas (Derivadas dos Pesticidas e Fertilizantes)</b>						
NH <sub>3</sub>	0,972	Kg	[81]	Emissão Atmosera - Amoníaco	Ammonia	-----
N <sub>2</sub> O	2,35	Kg	[81]	Emissão Atmosera - Protóxido de Azoto	Dinitrogen Monoxide	-----
NO <sub>x</sub>	0,492	Kg	[81]	Emissão Atmosera - Óxidos de Nitrogénio	Nitrogen Oxides	-----
Nitrato	177	kg	[81]	Emissão Água - (NO <sub>3</sub> -)	Nitrate	-----
Fosfate	0,402	Kg	[81]	Emissão Água - (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Phosphate	-----
Cd	2,628	g	[81]	Emissão Solo - Cádmio	Cadmium	-----
Cr	18,66	g	[81]	Emissão Solo - Crómio	Chromium	-----
Ni	4,356	g	[81]	Emissão Solo - Níquel	Nickel	-----
Pb	3,714	g	[81]	Emissão Solo - Chumbo	Lead	-----

Processamento do linho (Trituração, Ripagem e Espadelagem)				Fibres	Módulo criado: <i>Linho Espadelado</i>		
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Ref.	Notas	Módulo Usado	Base de dados	
Entrada	Linho Macerado	4,29	Kg	[80]	100%		-----
Entrada	Energia elétrica (Portugal)	<b>0,49</b>	<b>kWh</b>	[80]		Electricity, Low Voltage, Production PT, at Grid/PT U - Alterado 201	Ecoinvent 2 Alt.
<b>Saída</b>	<b>Linho Espadelado</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>	[80]	<b>24%</b>	-----	-----
Saída	Co-Produtos da espadelagem do Linho	3,09	Kg	[80]	72%	-----	-----
Saída	Co-Produtos: Sementes Linho	0,18	Kg	[80]	4%	-----	-----

Processamento do linho (Assedagem)				Fibres	Módulo criado: <i>Linho Assedado</i>		
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Ref.	Notas	Módulo Usado	Base de dados	
Entrada	Linho Espadelado	1,538	Kg	[80]	100%		-----
Entrada	Energia elétrica (Portugal)	<b>0,8459</b>	<b>kWh</b>	[80]		Electricity, Low Voltage, Production PT, at Grid/PT U - Alterado 201	Ecoinvent 2 Alt.
Entrada	Embalagens	0,001	Kg			<i>Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER</i>	Ecoinvent 2
Entrada	Transporte 60Km	60,6	kg.km			<i>Transport, lorry &gt;16t, fleet average/RER U</i>	Ecoinvent 2
<b>Saída</b>	<b>Linho Assedado em feixe</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>	[80]	<b>65%</b>	-----	-----
Saída	Co-Produtos da assedagem	0,538	Kg	[80]	35%	-----	-----

Filamentos de PLA				Fibres	Módulo criado: <i>PP Fibras</i>		
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Ref.	Notas	Módulo Usado	Base de dados	
Entrada	PLA Granulado	1	Kg			Poly lactide, granulate, NatureWorks Nebraska/US U (Alterado PT)	Ecoinvent 2 Alt.
Entrada	Extrusão	1	Kg		Considerou-se extrusão por falta de dados mais específicos	Extrusion, plastic/RER U (Alterado MAProj)	Ecoinvent 2 Alt.
<b>Saída</b>	<b>Filamentos de PLA</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>			-----	-----

Filamentos de PP				Fibres	Módulo criado: <i>PLA Fibras</i>		
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Ref.	Notas	Módulo Usado	Base de dados	
Entrada	PP Granulado	1	Kg			<i>Polypropylene, granulate, at plant/RER U</i>	Ecoinvent 2
Entrada	Extrusão	1	Kg		Considerou-se extrusão por falta de dados mais específicos	Extrusion, plastic/RER U (Alterado MAProj)	Ecoinvent 2 Alt.
<b>Saída</b>	<b>Filamentos de PP</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>			-----	-----

<b>FIO (Linho + PLA) - CENÁRIO A</b>			Textiles	Módulo criado: <i>Fio, Linho+PLA - CENARIO A</i>	
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Entrada Linho Assedado em feixe	0,4	Kg		Linho Assedado	-----
Entrada PLA Fibras	0,6	Kg		PLA Fibras	-----
Entrada Fiação	1	Kg		Yarn Production Bast Fibers,/IN U (Alterado para PT)	Ecoinvent 2 Alt.
<b>Saída Fio de Linho PLA</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>		-----	

<b>FIO (Fibras Vidro + PP) - CENÁRIO B</b>			Textiles	Módulo criado: <i>Fio, FibraVidro+PP - CENARIO B</i>	
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Entrada Fibras de vidro	0,4	Kg		<i>Glass Fiber, at Plant/RER U</i>	Ecoinvent
Entrada PP Fibras	0,6	Kg		PP Fibras	
Entrada Fiação	1	Kg		Yarn Production Bast Fibers,/IN U (Alterado para PT)	Ecoinvent 2 Alt.
<b>Saída Fio de Fibra Vidro + PP</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>		-----	-----

<b>TECIDO (Linho + PLA) - CENÁRIO A</b>			Textiles	Módulo criado: <i>Tecido, Linho+PLA - CENARIO A</i>	
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Entrada Fio de Linho + PLA	1	Kg		Fio, Linho+PLA - CENARIO A	-----
Entrada Tecelagem	1	Kg		Weaving, bast Fibers/IN U (Alterado para PT)	Ecoinvent 2 Alt.
<b>Saída Tecido, Linho + PLA</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>		-----	

<b>TECIDO (Fibras Vidro + PP) - CENÁRIO B</b>			Textiles	Módulo criado: <i>Tecido, FibrasVidro+PP - CENARIO B</i>	
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Entrada Fio de Fibra de Vidro + PP	1	Kg		Fio, FibraVidro+PP - CENARIO B	-----
Entrada Tecelagem	1	Kg		Weaving, bast Fibers/IN U (Alterado para PT)	Ecoinvent 2 Alt.
<b>Saída Tecido, Fibra Vidro + PP</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>		-----	-----

<b>Laminado (Linho + PLA) - CENÁRIO A</b>			Laminates	Módulo criado: <i>Placa, Linho + PLA - CENARIO A</i>	
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Entrada Tecido PLA+Linho	1	Kg	Nao se considerou a perda de material	Tecido, Linho+PLA - CENARIO A	-----
Entrada Termoformação	1	Kg	Inclui consumo de energia	<i>Thermoforming, with calendering/RER U</i>	Ecoinvent 2
Entrada Embalagem	0,163	Kg	0,163Kg por cada Kg (2Kg por cada 12,3 Kg de placa).	<i>Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U</i>	Ecoinvent 2
Entrada Transporte	23,26	kg.km	20 Km (transporte até fábrica) 1,163*20 = <b>23,26kg.km</b>	<i>Transport, lorry &gt;16t , fleet average/RER U</i>	Ecoinvent 2
<b>Saída Placa Biocompósito</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>	Inclui empacotamento e transportes	-----	

<b>Laminado (Fibra Vidro + PP) - CENÁRIO B</b>			Laminates	Módulo criado: <i>Placa, FibraVidro+PP - CENARIO B</i>	
ENTRADAS/SAÍDAS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Entrada Tecido PP + Fibras Vidro	1	Kg	Nao se considerou a perda de material	Tecido, Fibras Vidro + PP - CENARIO B	-----
Entrada Termoformação	1	Kg	Inclui consumo de energia	<i>Thermoforming, with calendering/RER U</i>	Ecoinvent 2
Entrada Embalagem	0,163	Kg	0,163Kg por cada Kg (2Kg por cada 12,3 Kg de placa).	<i>Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U</i>	Ecoinvent 2
Entrada Transporte	23,26	kg.km	20 Km (transporte até fábrica) 1,163*20 = <b>23,26kg.km</b>	<i>Transport, lorry &gt;16t , fleet average/RER U</i>	-----
<b>Saída Placa Fibras de Vidro + PP</b>	<b>1</b>	<b>Kg</b>	Inclui empacotamento e transportes	-----	

## FABRICO DOS COMPONENTES (Sub-Assemblagem):

Componentes Estruturais BIOCAMPÓSITO (1 suporte) - CENÁRIO A					Módulo criado: Componentes Estruturais Biocomposito - CENARIO A
MATERIAIS / PROCESSOS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Materials Placa BIOCAMPÓSITO	320,68	g	Nao se considera aqui desperdício pois é alocado a 100%	Placa Linho + PLA	-----
Processos Maquinação CNC	3,979	kW.h		Electricity, Low Voltage, Production PT, at Grid/PT U - Alterado 2014	Ecoinvent 2 Alt.

Componentes Estruturais PRFV (1 suporte) - CENÁRIO B					Módulo criado: Componentes Estruturais PRFV - CENARIO B
MATERIAIS / PROCESSOS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Materials Placa PRFV	344,37	g	Nao se considera aqui desperdício pois é alocado a 100%	Placa Fibra Vidro + PP	-----
Processos Maquinação CNC	3,979	kW.h		Electricity, Low Voltage, Production PT, at Grid/PT U - Alterado 2014	Ecoinvent 2 Alt.

Componentes PA66 (1 suporte) - CENÁRIO A + B					Módulo criado: Componentes PA66
MATERIAIS / PROCESSOS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Materials PA 66	41,82	g	Comps PA 66 = 41,82gr Total por 1 Suporte	Nylon 66, at Plant/RER U	Ecoinvent 2
Materials Moldacao por Injeção	41,82	g	Nao se considerou a perda de material	Injection Moulding/RER U	Ecoinvent 2
Materials Embalagens	10	g	100 Comp's PA66 = 1Kg Embalagem. 1/100= 0,01Kg = <b>10g</b>	Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U	Ecoinvent 2
Processos Transportes	7,773	kg.km	150Km (Transporte): 41,82+10=51,82gr = 0,0582Kg x 150 = <b>7,773</b>	Transport, lorry >16t , fleet average/RER U	Ecoinvent 2

## ASSEMBLAGEM FINAL (Assemblagem, Embalagens e Transporte Final)

Suporte BIOCAMPÓSITO- CENÁRIO A					Módulo criado: Suporte Biocomposito - CENARIO A
MATERIAIS / PROCESSOS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Materials Comp. Estruturais Biocomp.	1	p	320,68g	Componentes Estruturais Biocomposito - CENARIO A	-----
Materials Componentes PA66	1	p	41,82g	Componentes PA66	-----
Materials Embalagens	0,3	Kg	Embalagem por unidade de produto. 362,5+300=662,5 = <b>0,6625Kg</b>	Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U	Ecoinvent 2
Processos Transporte	132,5	kg.km	200Km (transporte até centro de distribuição) 0,6625*200= <b>132,5</b>	Transport, lorry >16t , fleet average/RER U	Ecoinvent 2

Suporte PRFV - CENÁRIO B					Módulo criado: Suporte PRFV - CENARIO B
MATERIAIS / PROCESSOS	Valor	Unid.	Notas	Módulo Usado	Base de dados
Materials Comp. Estruturais PRFV	1	p	344,37	Componentes Estruturais PRFV - CENARIO B	-----
Materials Componentes PA66	1	p	41,82g	Componentes PA66	-----
Materials Embalagens	0,3	Kg	Embalagem por unidade de produto. 386,19+300=686,2 = <b>0,6862Kg</b>	Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U	Ecoinvent 2
Processos Transporte	137,24	kg.km	200Km (transporte até centro de distribuição) 0,6862*200 = <b>137,24</b>	Transport, lorry >16t , fleet average/RER U	Ecoinvent 2

## **Anexo G**

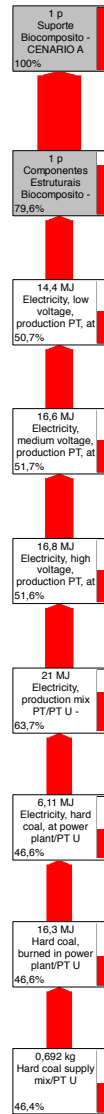
**Diagramas dos processos responsáveis por categoria de impacto e cenário**



Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

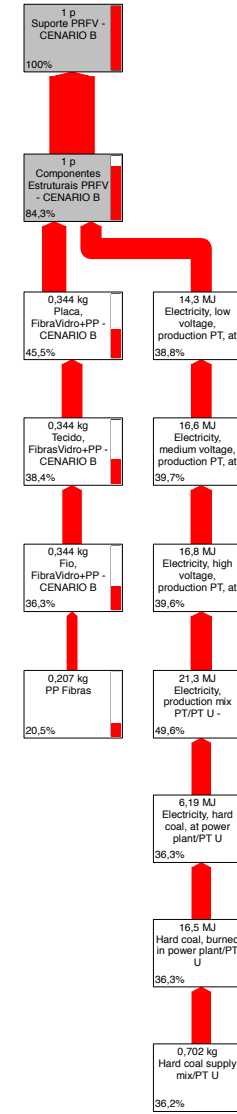
**Depleção de Recursos Abióticos**



Suporte PRFV - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

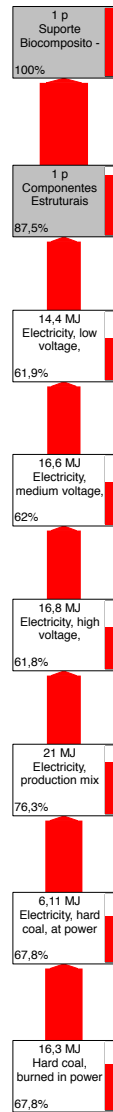
**Depleção de Recursos Abióticos**



Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

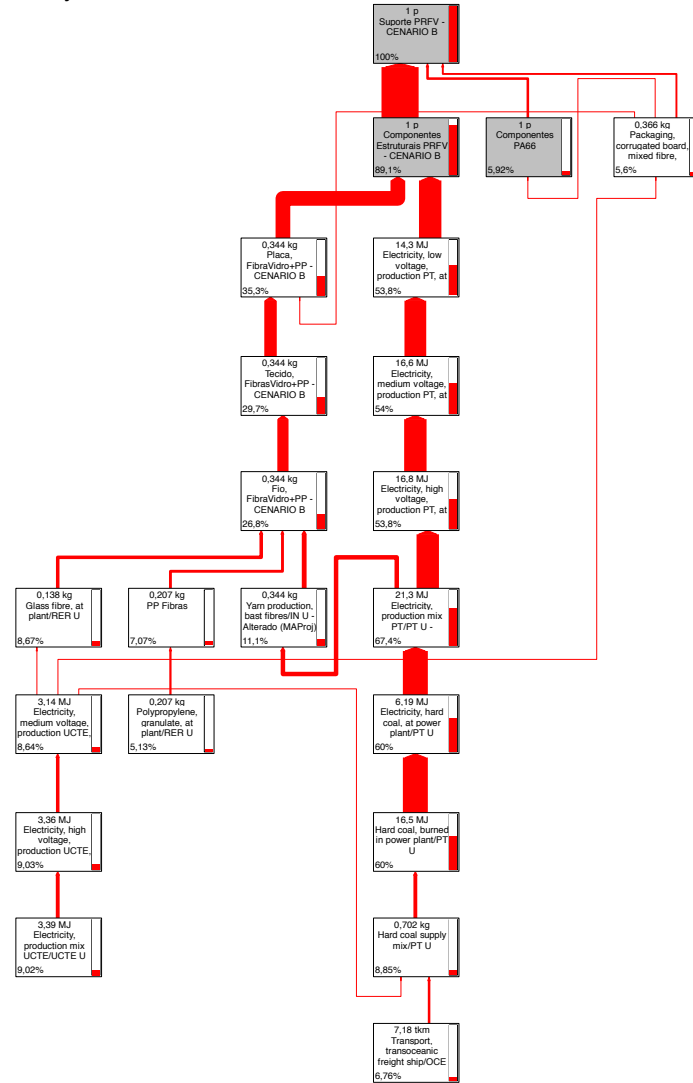
**Acidificação**



Suporte PRFV - Cenário B

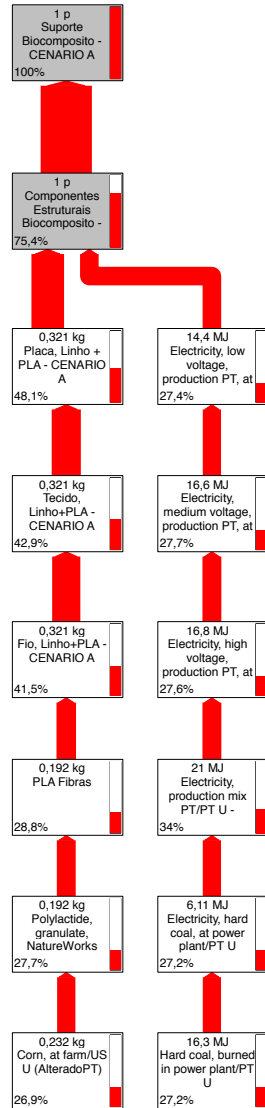
Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

**Acidificação**



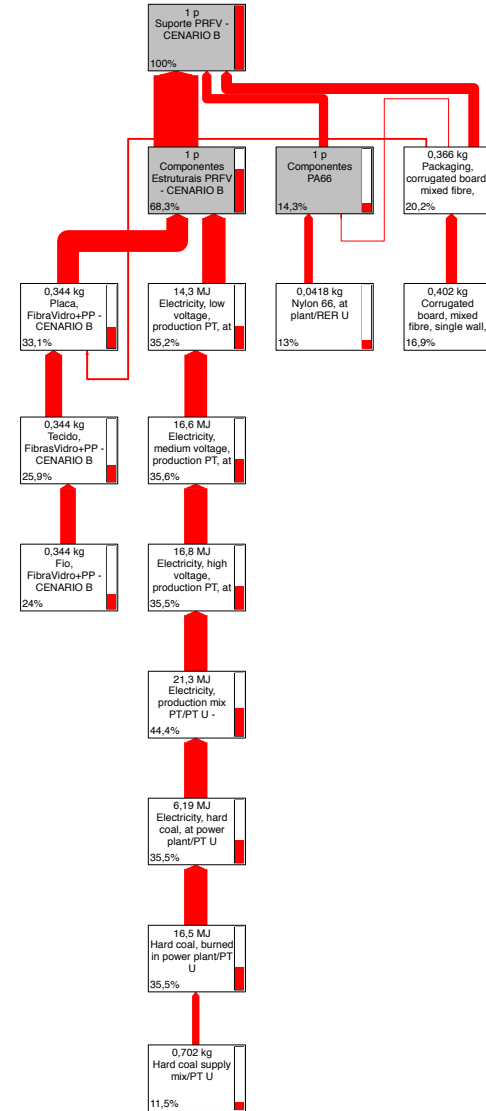
Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eutrofização**



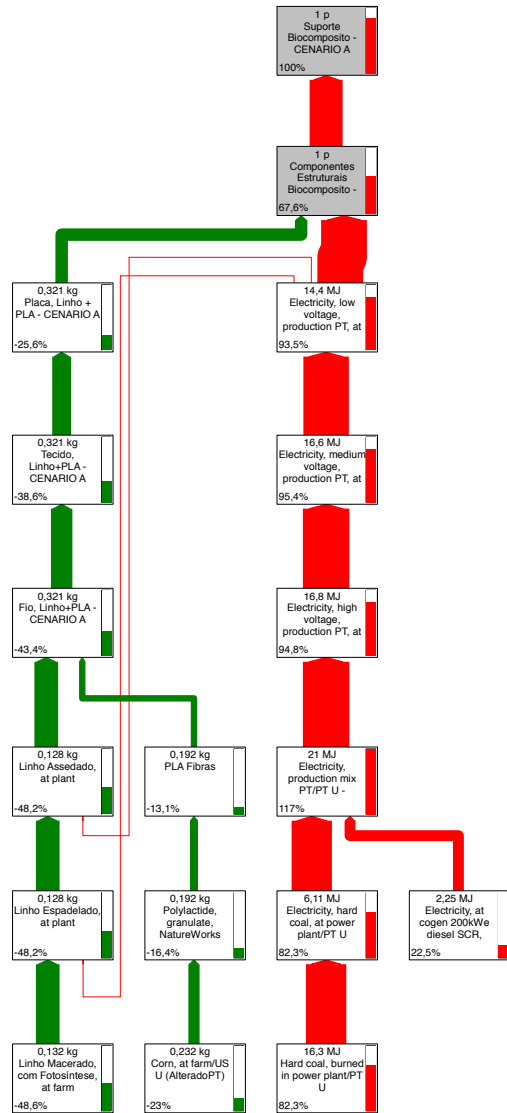
Suporte PRFV - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eutrofização**



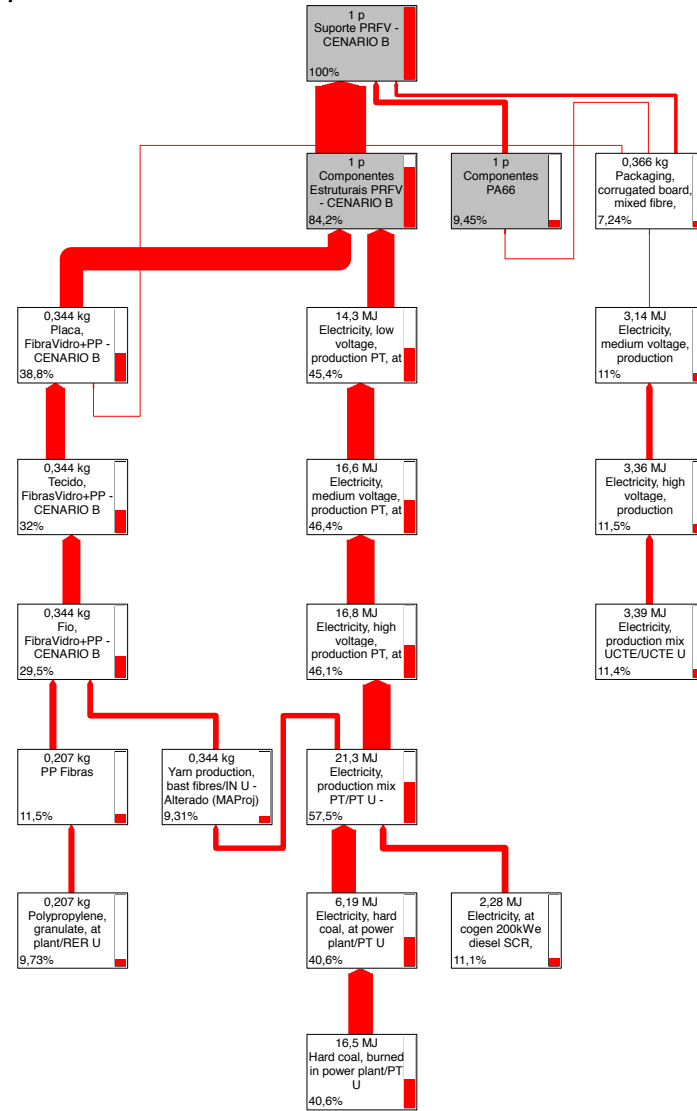
Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Aquecimento Global**



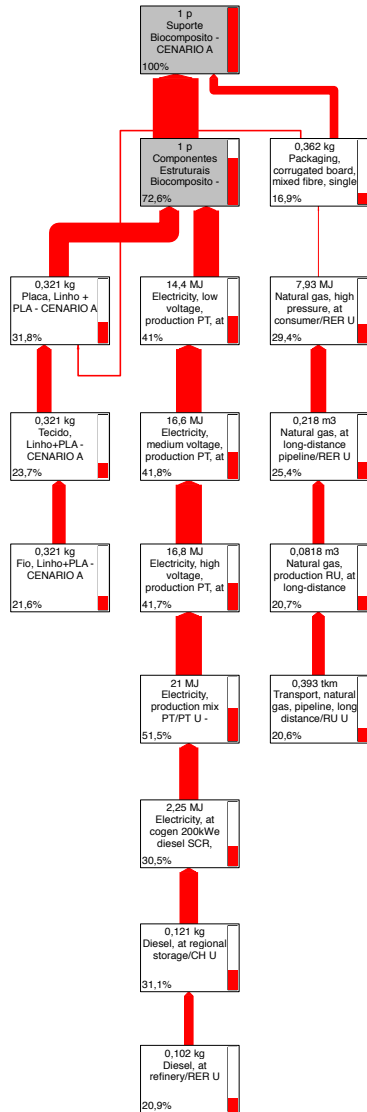
Suporte PRFV - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Aquecimento Global**



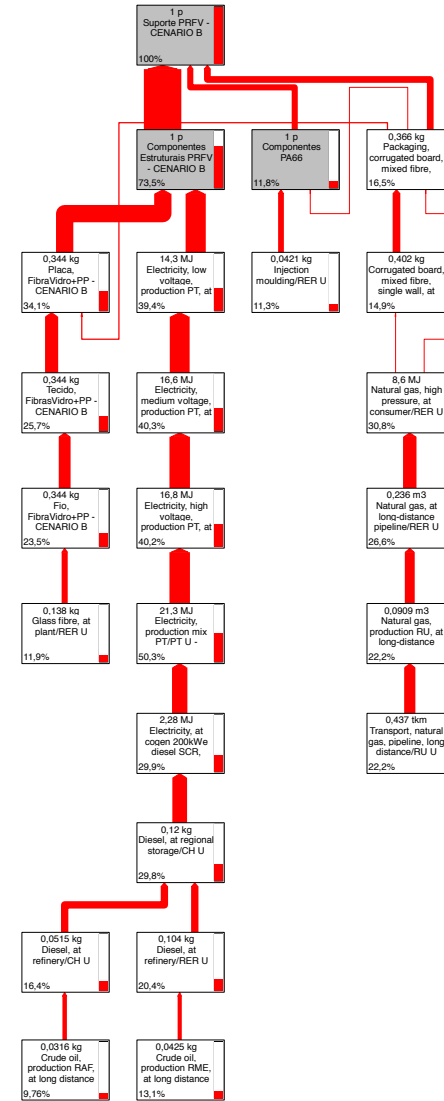
Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Destruição da Camada de Ozono**



Suporte PRFV - Cenário B

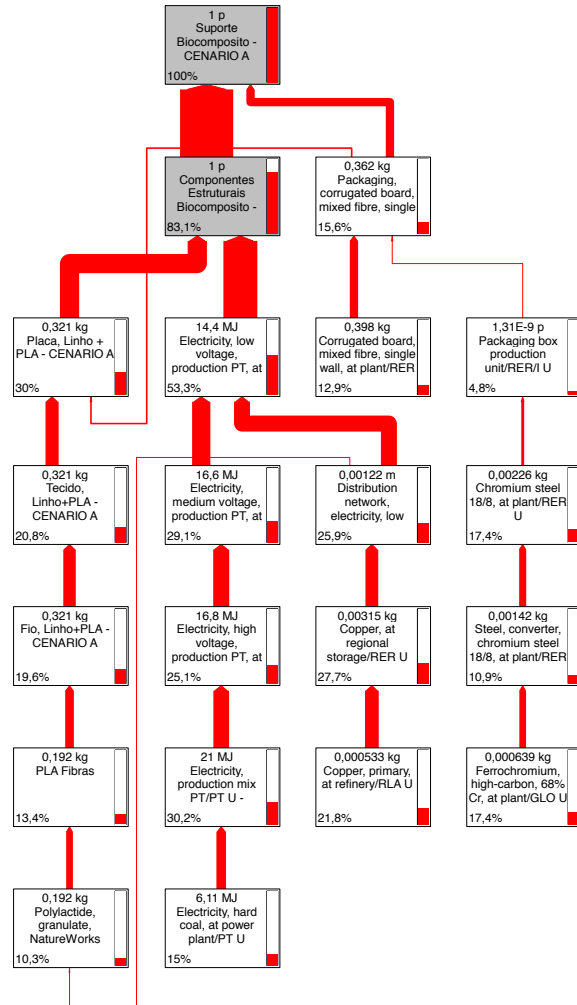
Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Destruição da Camada de Ozono**



Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

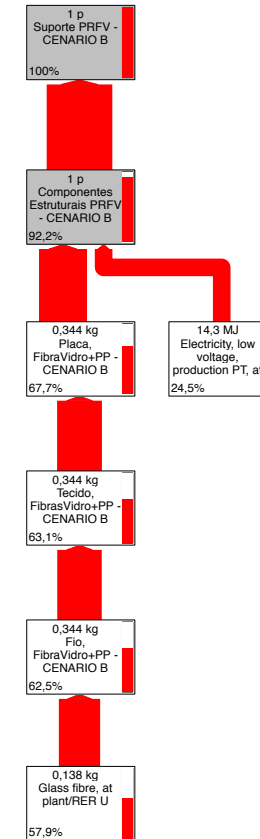
**Toxicidade Humana**



Suporte PRFV - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

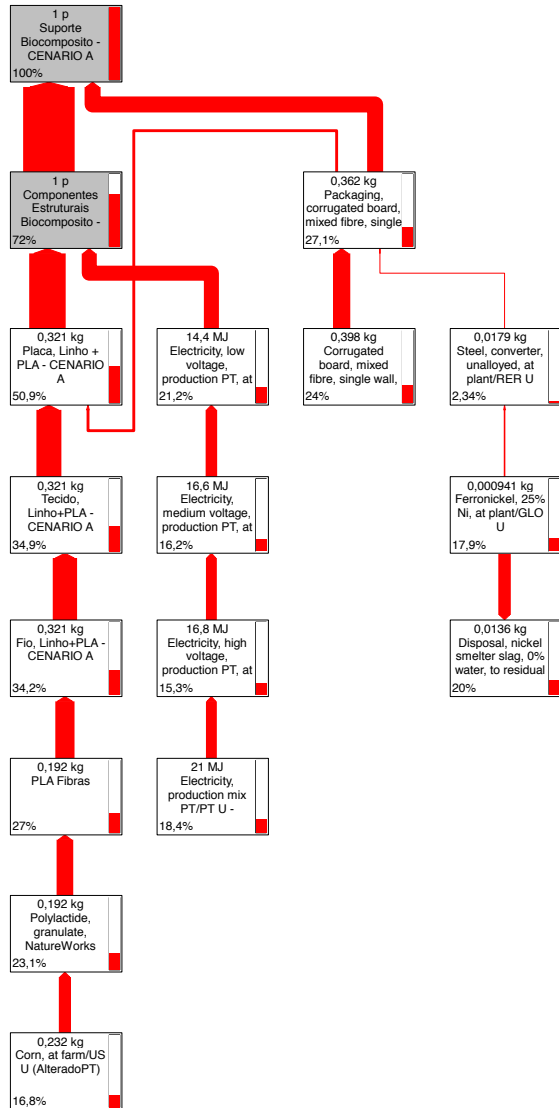
**Toxicidade Humana**



Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

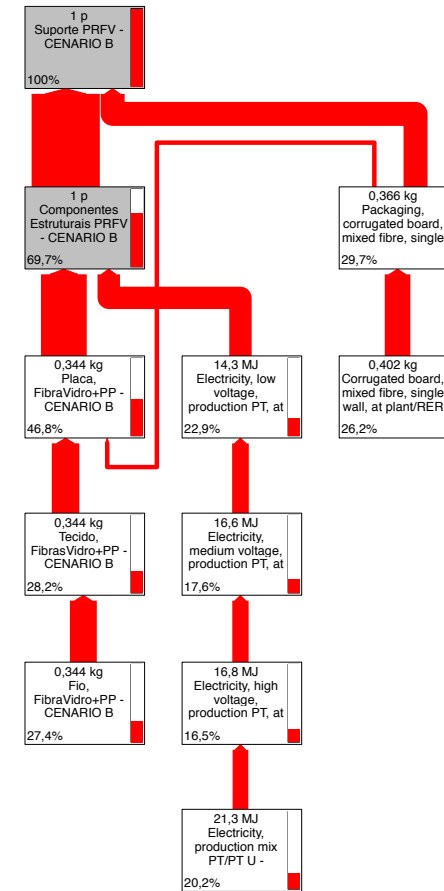
**Eco-toxicidade dos meios aquáticos (água doce)**



Suporte PRFV - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

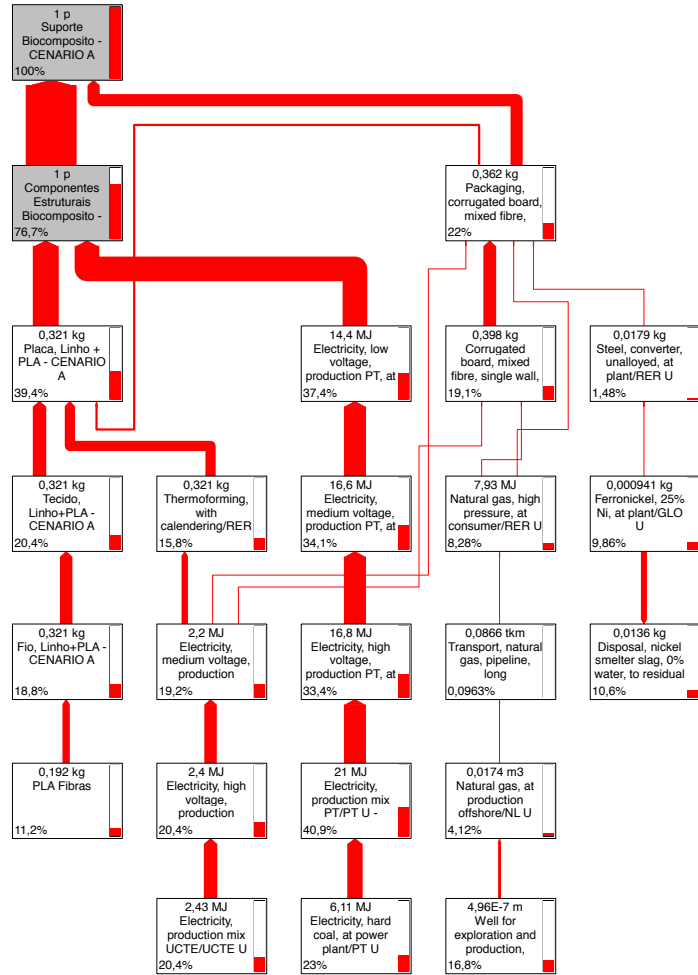
**Eco-toxicidade dos meios aquáticos (água doce)**



Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

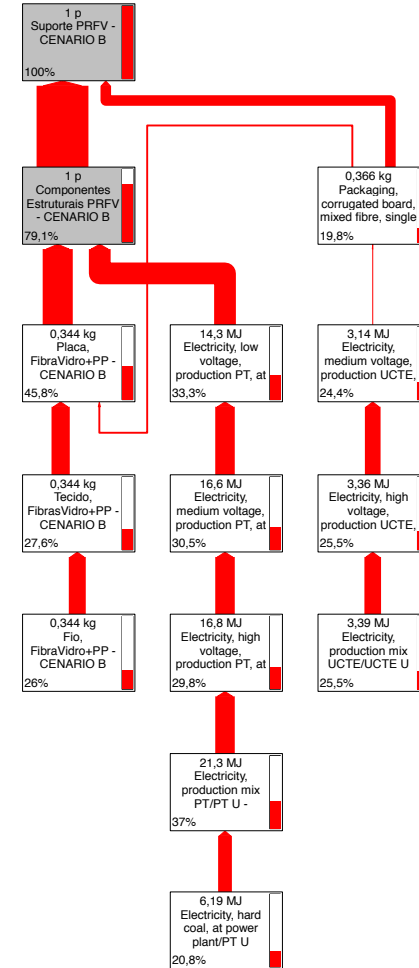
**Eco-toxicidade aquática marinha**



Suporte PRFV - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

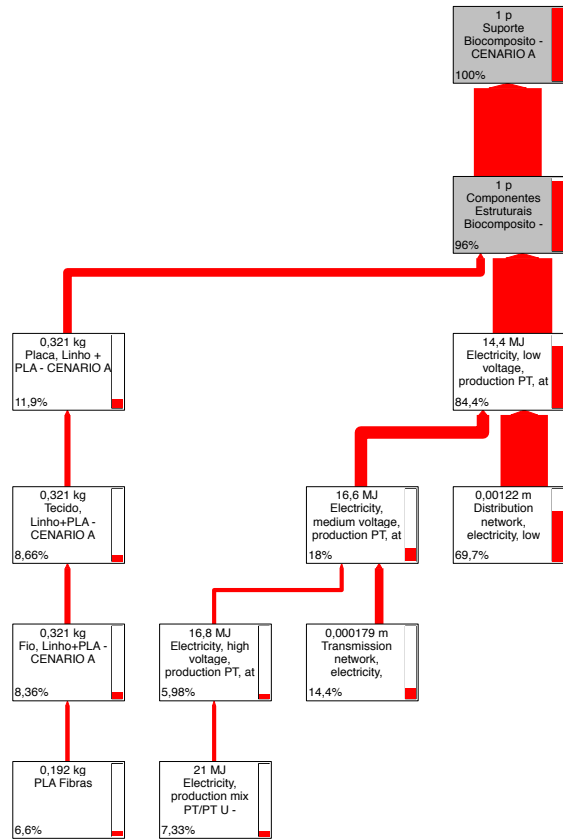
**Eco-toxicidade aquática marinha**



Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

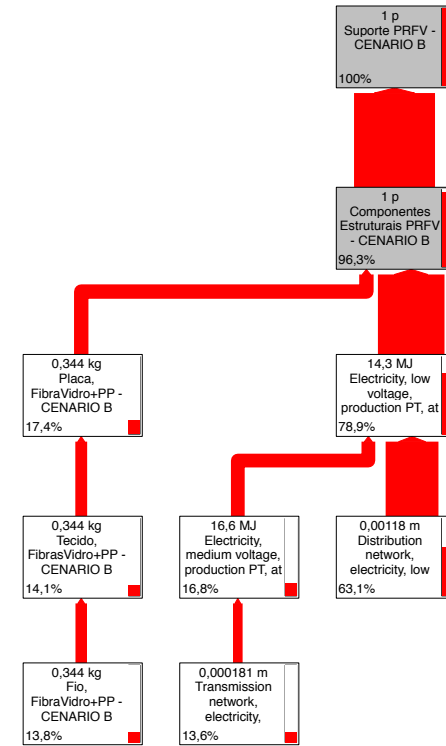
**Eco-toxicidade Terrestre**



Suporte PRFV - Cenário B

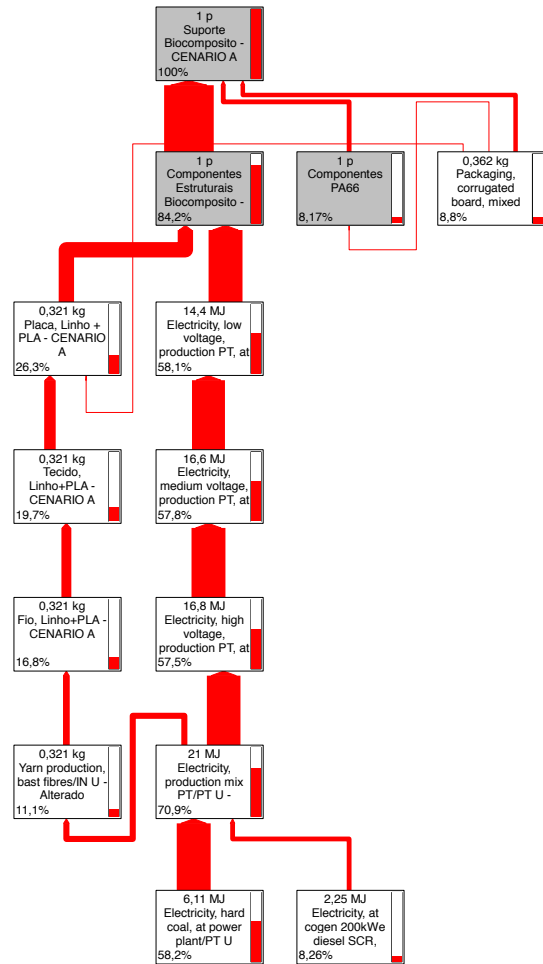
Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

**Eco-toxicidade Terrestre**



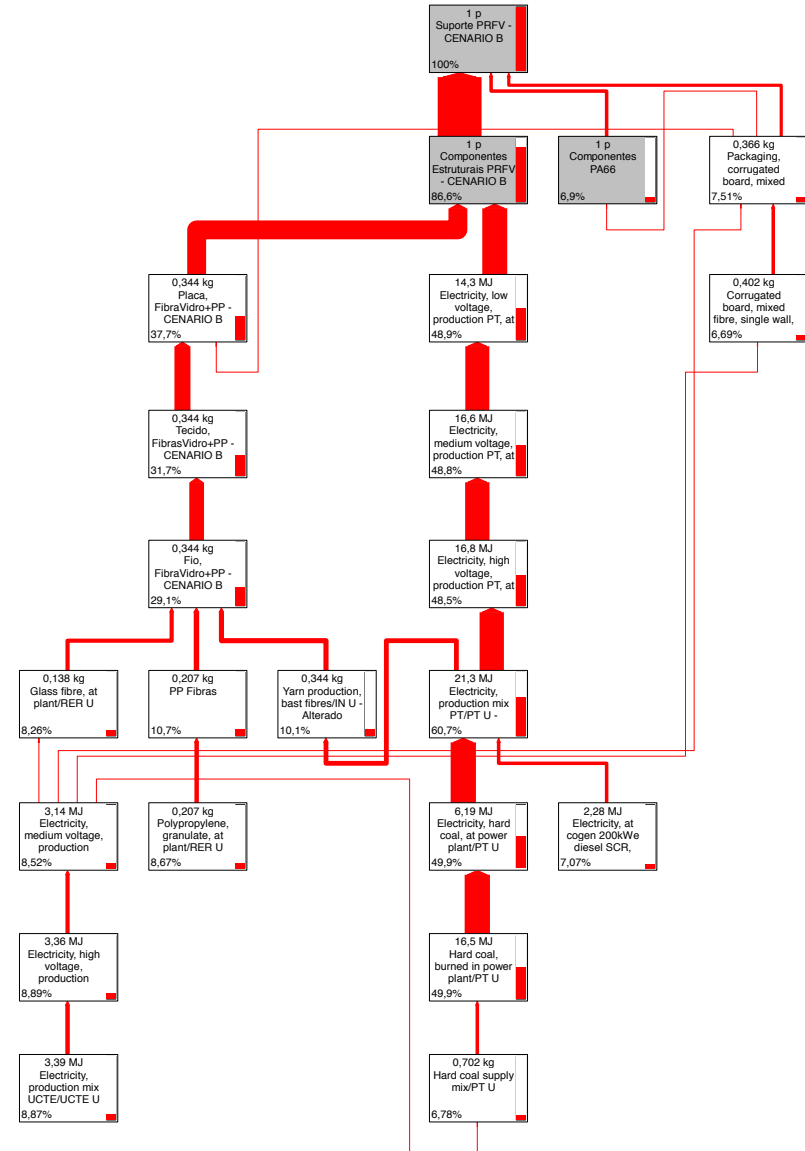
Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Oxidação fotoquímica**



Suporte PRFV - Cenário B

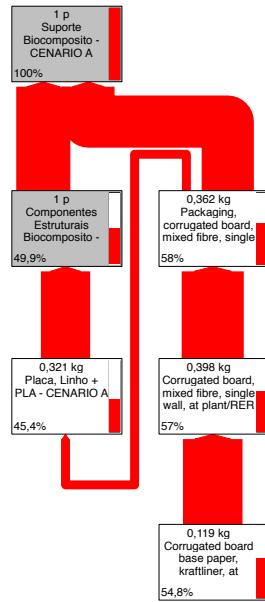
Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Oxidação fotoquímica**



Suporte Biocompósito - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

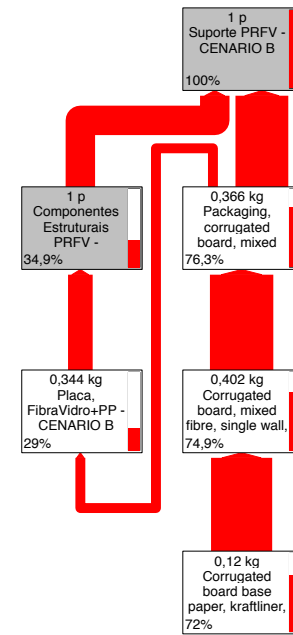
**Uso e ocupação do solo**



Suporte PRFV - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

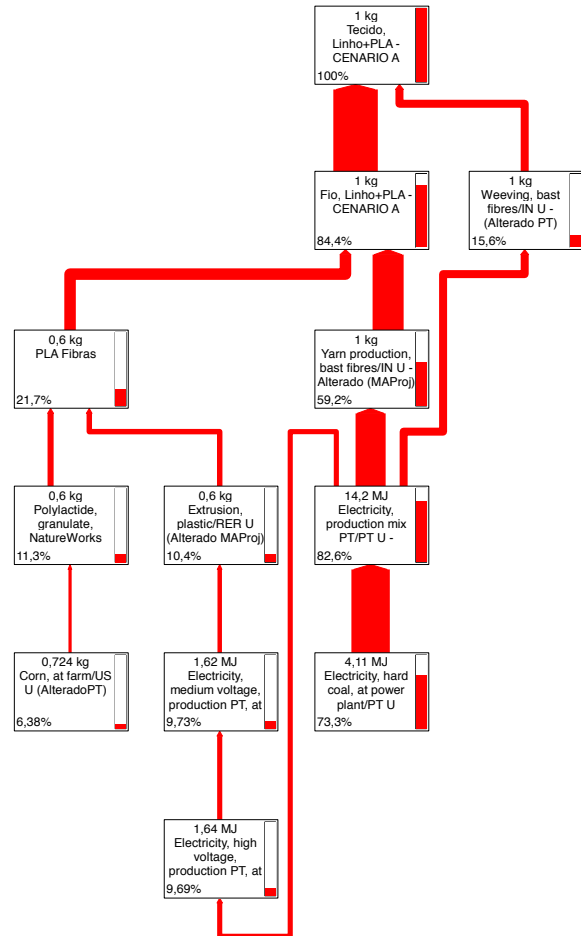
**Uso e ocupação do solo**





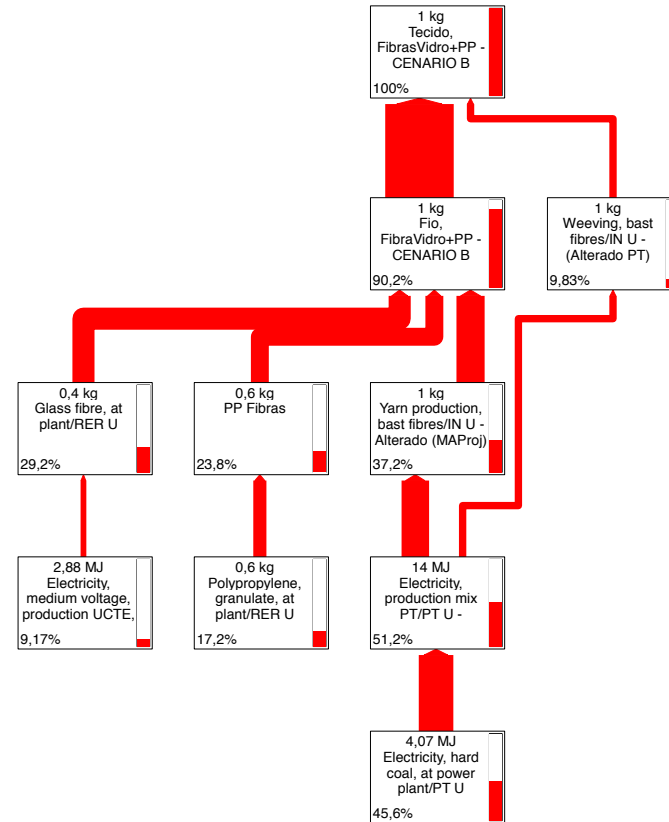
Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Acidificação**



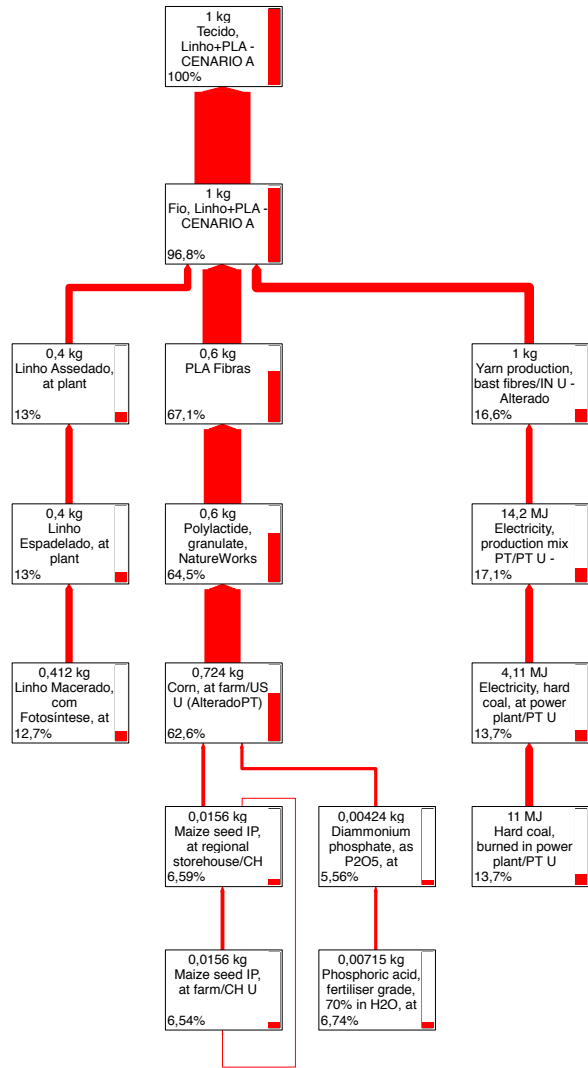
Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Acidificação**



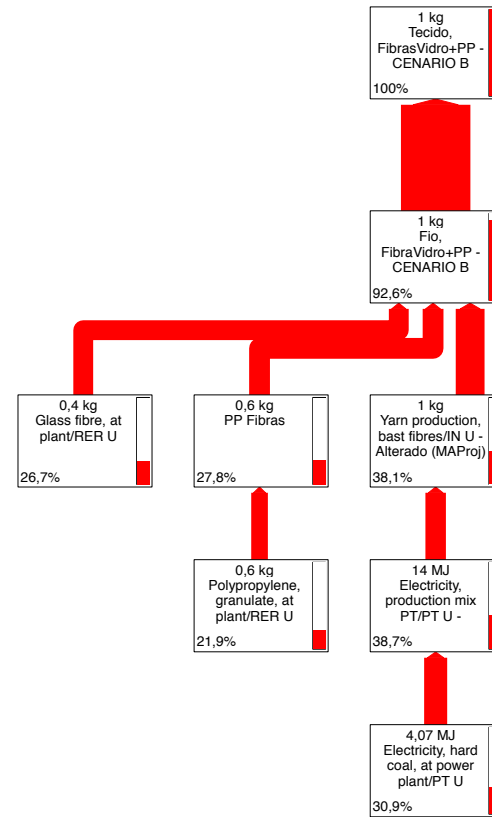
Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eutrofização**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

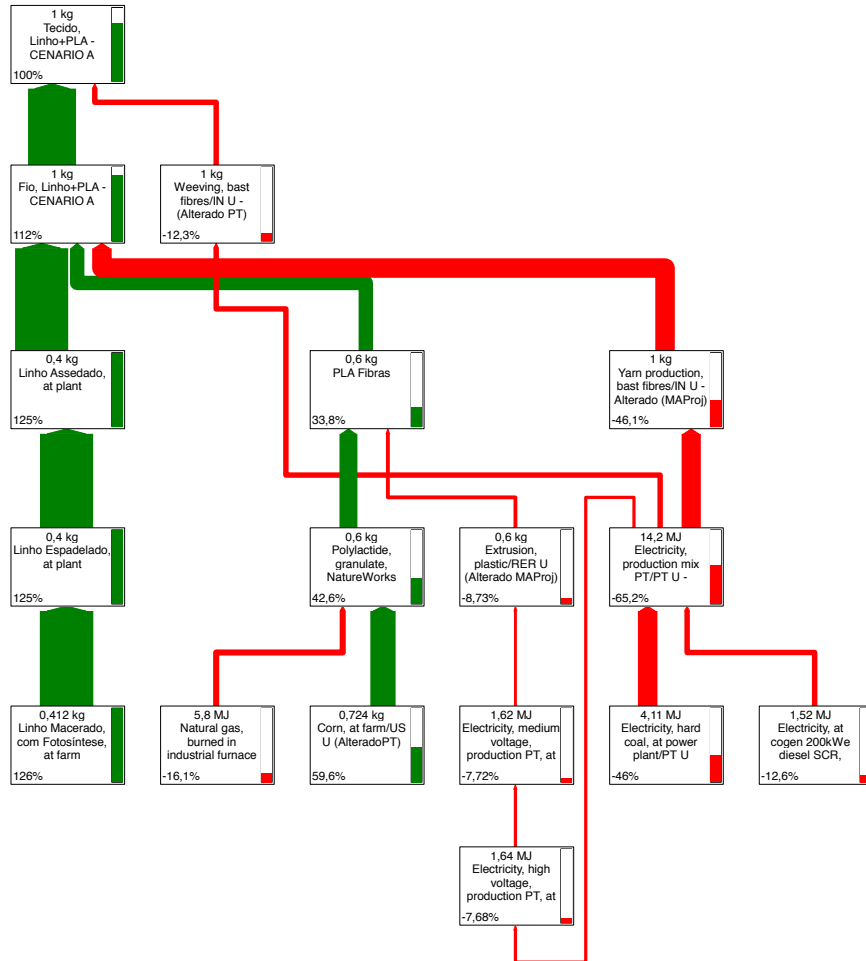
Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eutrofização**



Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

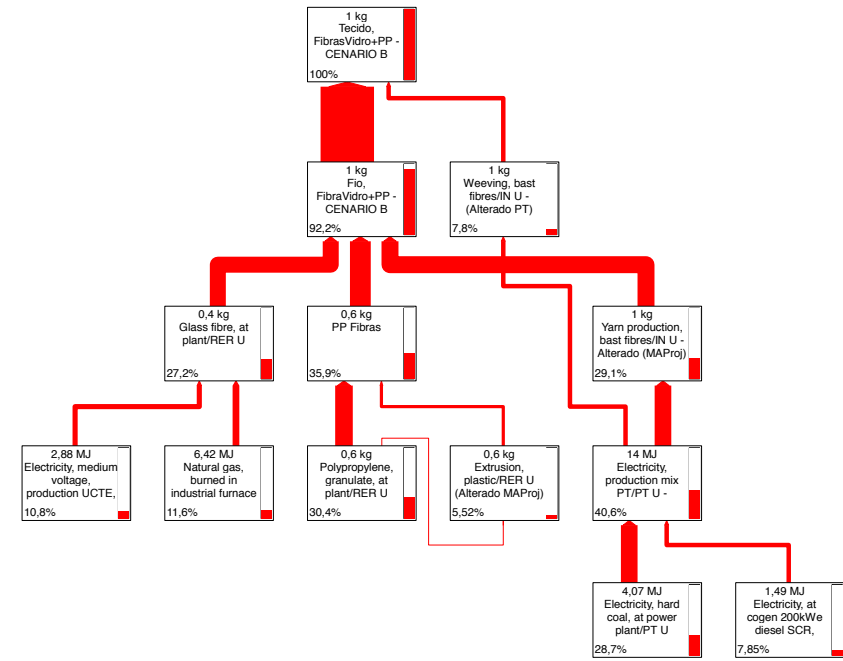
**Aquecimento Global**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

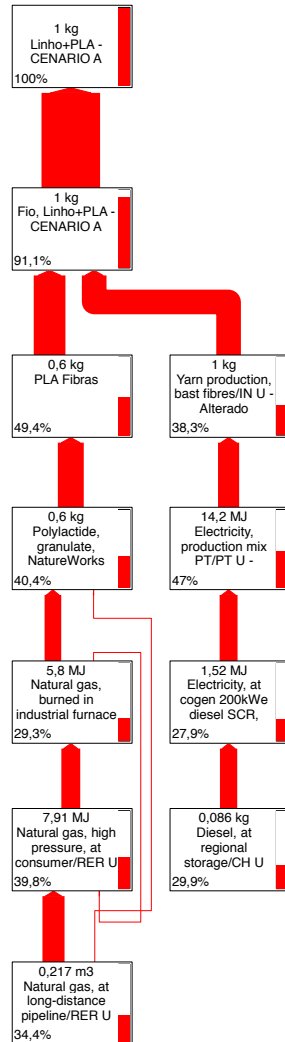
**Aquecimento Global**



Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

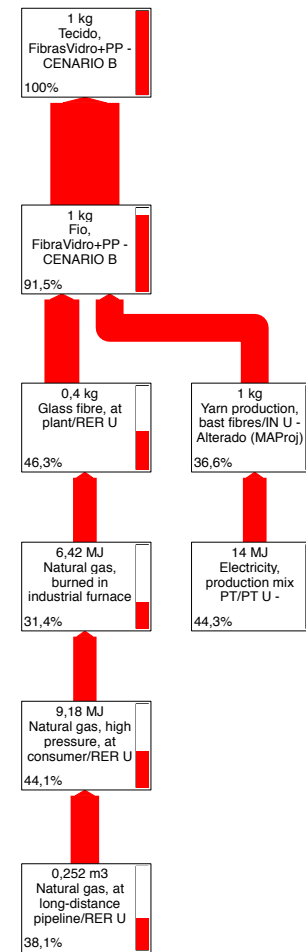
**Destruição da Camada de Ozono**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

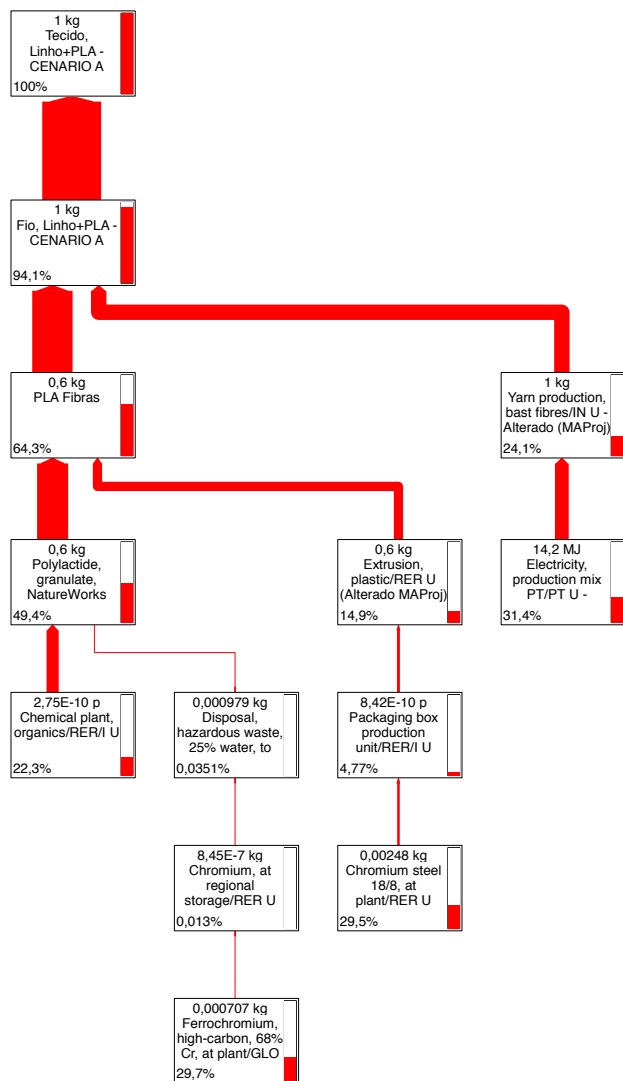
**Destruição da Camada de Ozono**



Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

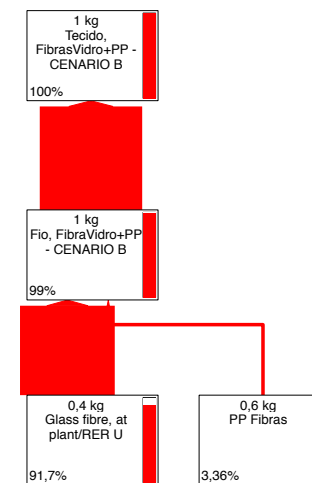
**Toxicidade Humana**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

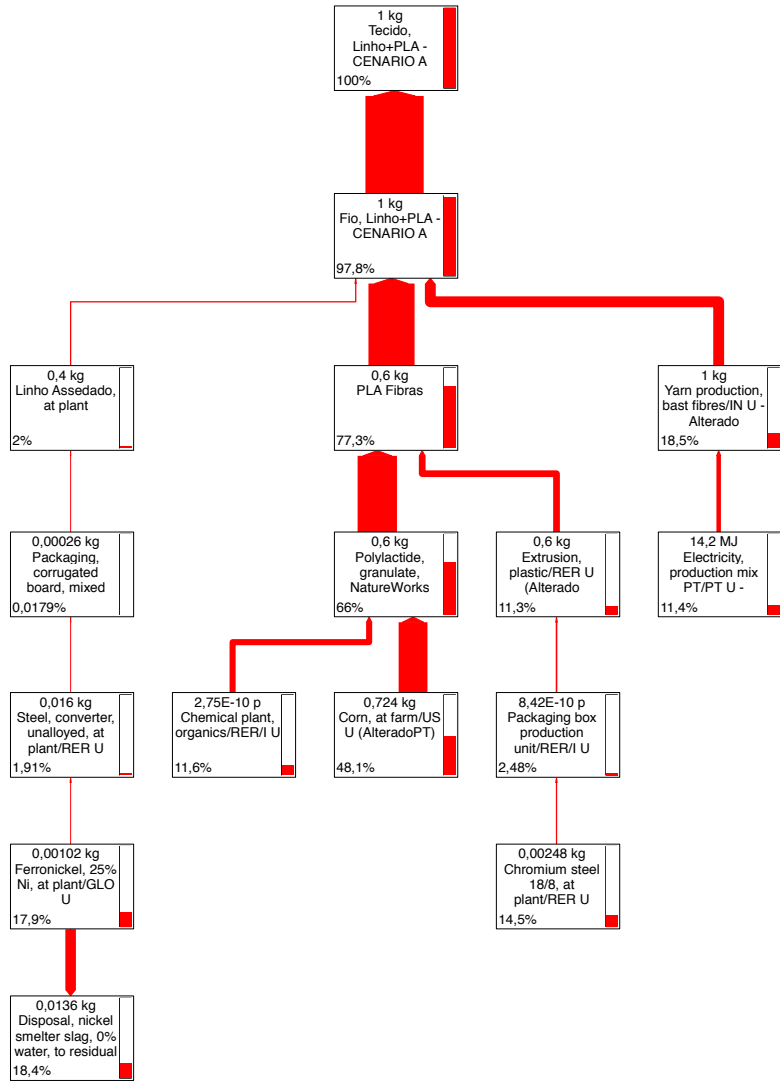
Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

**Toxicidade Humana**



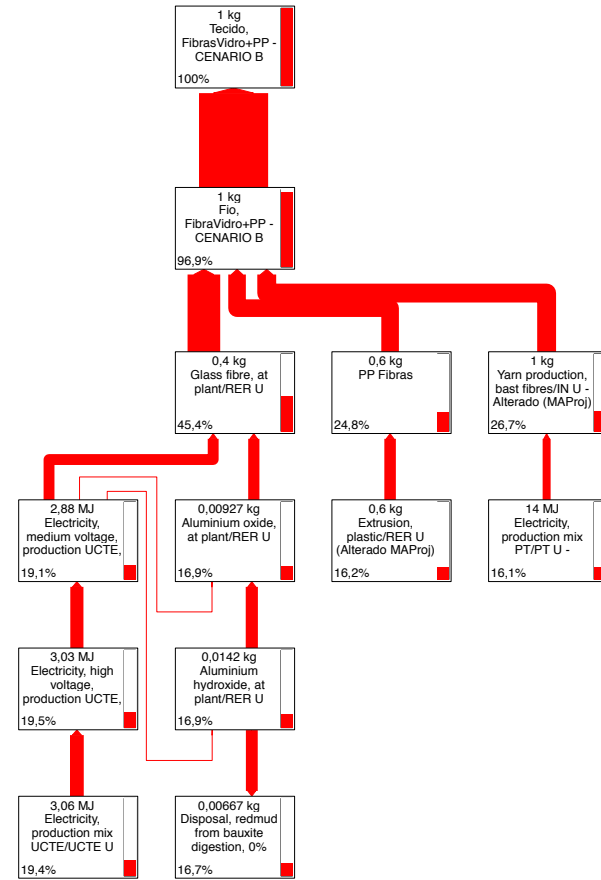
Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eco-toxicidade dos meios aquáticos (água doce)**



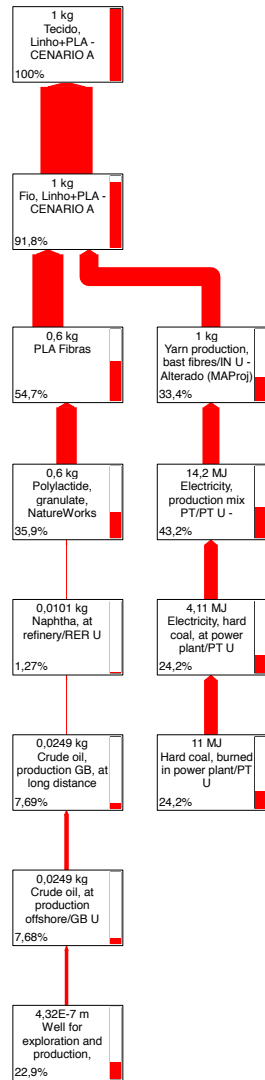
Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eco-toxicidade dos meios aquáticos (água doce)**



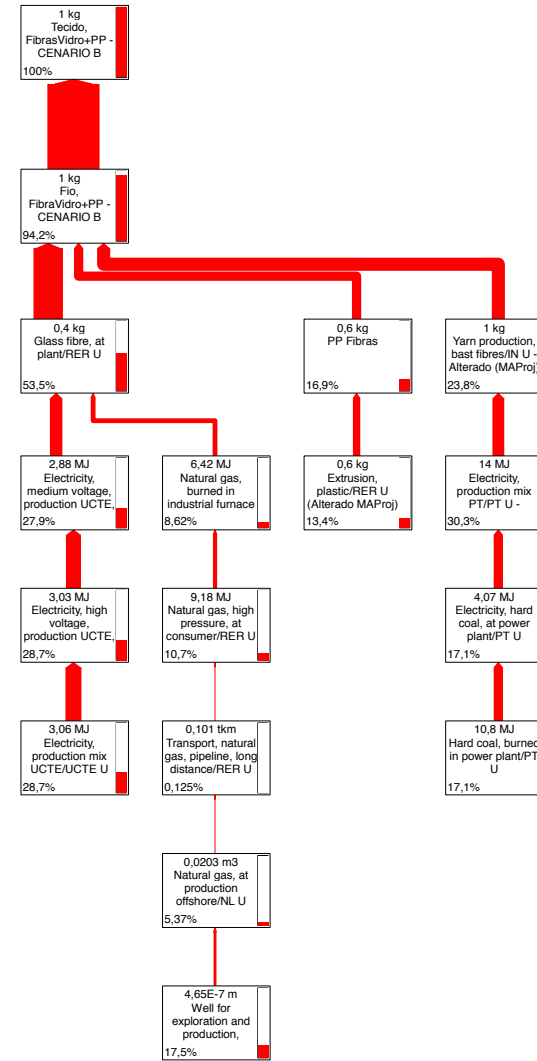
Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eco-toxicidade aquática marinha**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

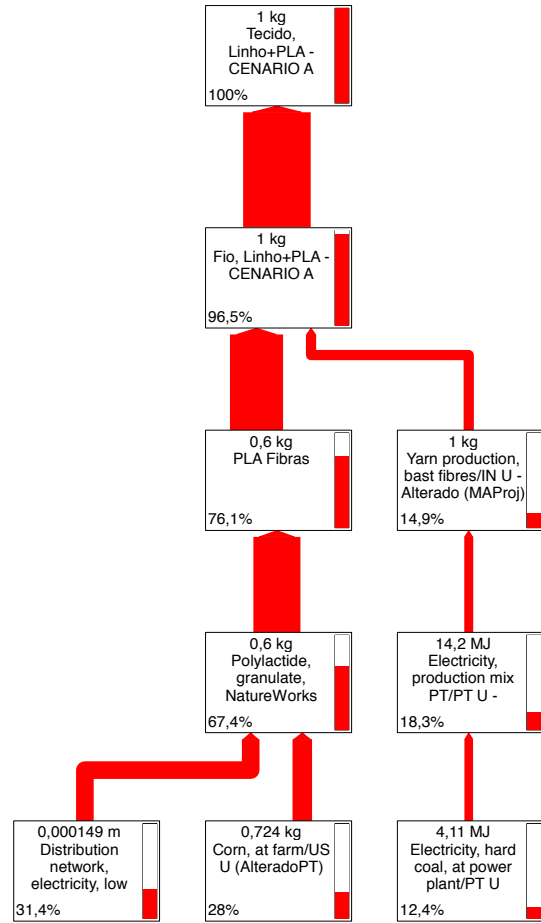
Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:  
**Eco-toxicidade aquática marinha**



Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

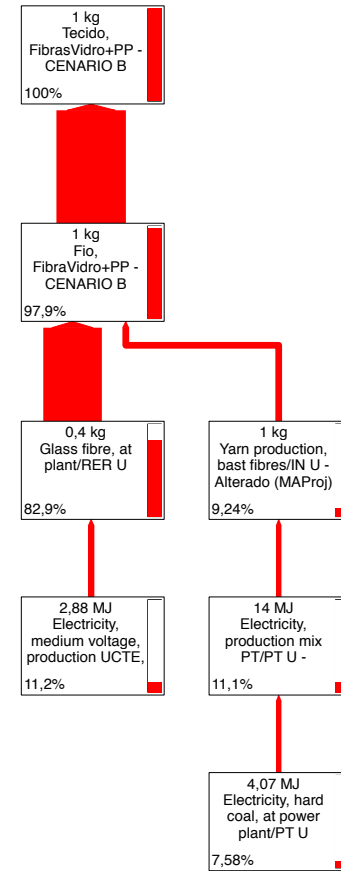
**Eco-toxicidade Terrestre**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

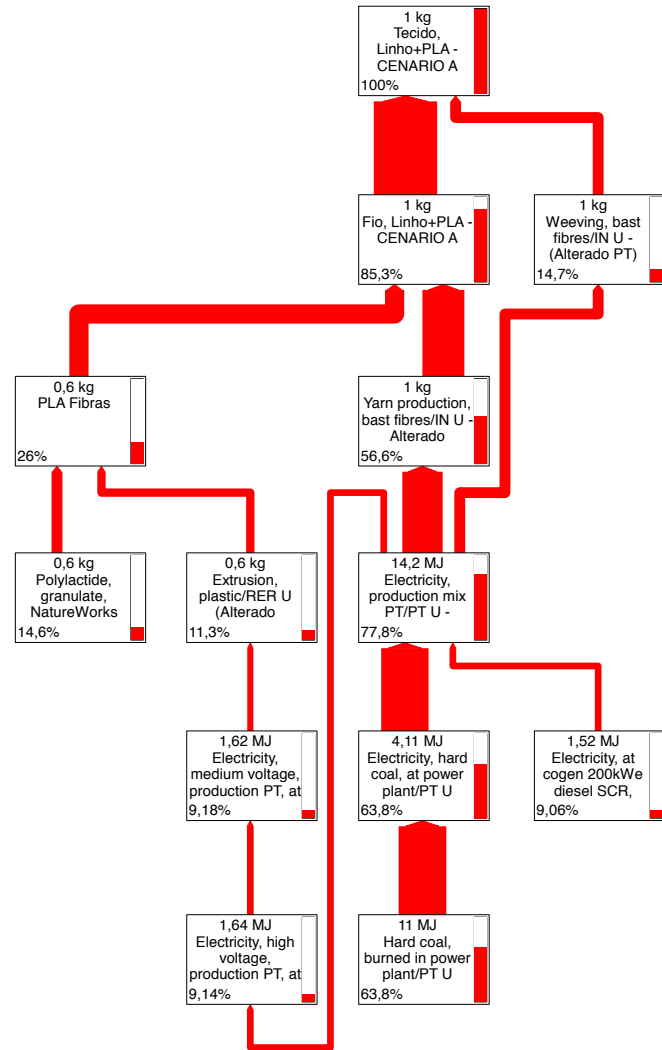
**Eco-toxicidade Terrestre**



Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

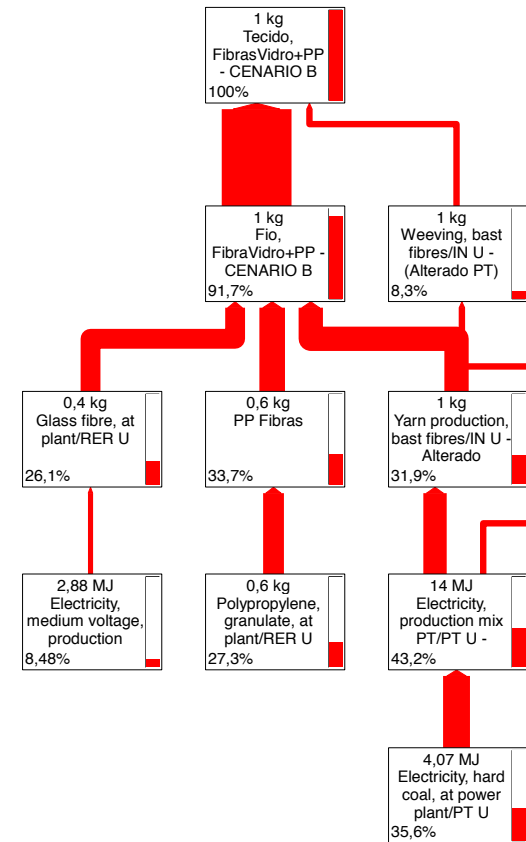
**Oxidação fotoquímica**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

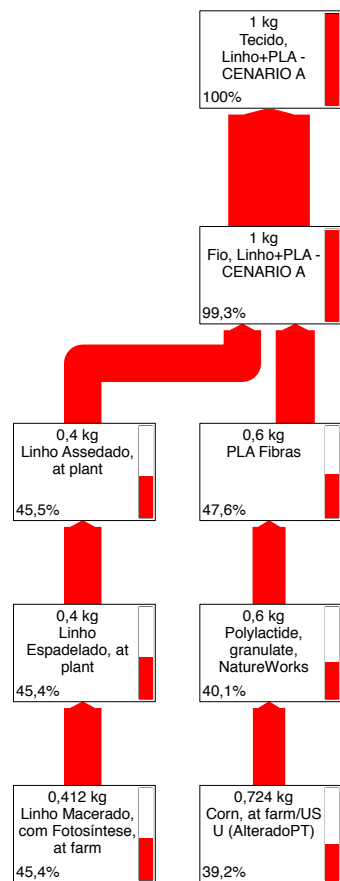
**Oxidação fotoquímica**



Tecido PLA + Linho - Cenário A

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

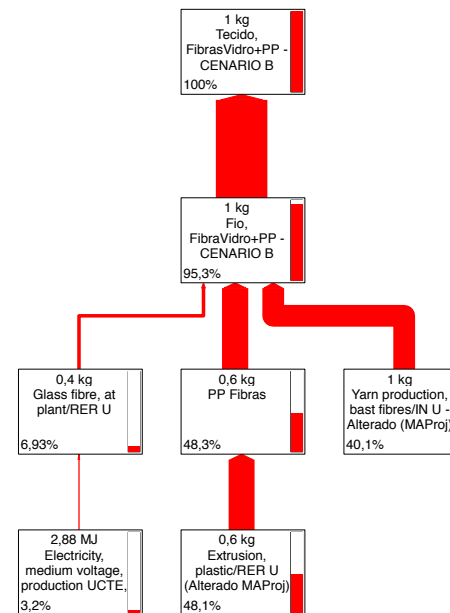
**Uso e ocupação do solo**



Tecido PP + Fibra Vidro - Cenário B

Substâncias / Processos mais responsáveis pela categoria de impacto:

**Uso e ocupação do solo**



## **Anexo H**

### **Tabelas de caracterização dos impactos**



### Caracterização dos impactos da produção de filamentos de linho comparativamente com fibras de vidro

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>CENÁRIO A Linho+PLA</b>	<b>CENÁRIO B Vidro+PP</b>	<b>CENÁRIO A (Relativo %)</b>	<b>CENÁRIO B (Relativo %)</b>
Recursos Abióticos	kg Sb eq	5,52E-04	6,65E-03	8,3	100
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	6,16E-04	5,42E-03	11,4	100
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> eq	5,45E-04	4,10E-04	100	75,3
Aquecimento Global	kg CO <sub>2</sub> eq	-0,412	0,908	-45,4	100
Camada de ozono	kg CFC-11 eq	8,05E-09	6,83E-08	11,8	100
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	0,0511	3,14	1,63	100
Eco-tox. (água doce)	kg 1,4-DB eq	6,27E-03	0,0589	10,6	100
Eco-tox. (marinha)	kg 1,4-DB eq	11,9	128	9,36	100
Eco-tox. (terrestre)	kg 1,4-DB eq	7,26E-04	0,0144	5,06	100
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,86E-05	2,07E-04	8,99	100
Uso e ocupação do solo	m <sup>2</sup> ano	0,501	0,0127	100	2,54

### Caracterização dos impactos da produção de PLA comparativamente com PP

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>CENÁRIO A Linho+PLA</b>	<b>CENÁRIO B Vidro+PP</b>	<b>CENÁRIO A (Relativo %)</b>	<b>CENÁRIO B (Relativo %)</b>
Recursos Abióticos	kg Sb eq	2,44E-03	1,12E-02	21,8	100
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	8,39E-04	2,13E-03	39,3	100
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> eq	1,41E-03	2,24E-04	100	15,9
Aquecimento Global	kg CO <sub>2</sub> eq	-1,63E-01	6,75E-01	-24,1	100
Camada de ozono	kg CFC-11 eq	3,64E-08	5,67E-11	100	0,156
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	1,75E-01	2,11E-02	100	12,1
Eco-tox. (água doce)	kg 1,4-DB eq	7,69E-02	7,38E-03	100	9,6
Eco-tox. (marinha)	kg 1,4-DB eq	3,98E+01	5,67E+00	100	14,3
Eco-tox. (terrestre)	kg 1,4-DB eq	4,56E-03	3,11E-05	100	0,683
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,19E-05	1,45E-04	28,9	100
Uso e ocupação do solo	m <sup>2</sup> ano	2,93E-01	1,87E-04	100	0,0638

## Caracterização dos impactos da produção de PLA comparativamente com PP, PA66 e PC

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>PLA</b>	<b>PP</b>	<b>PLA</b>	<b>PP</b>
Recursos Abióticos	kg Sb eq	2,44E-03	1,12E-02	2,06E-02	1,71E-02
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	8,39E-04	2,13E-03	1,01E-02	8,55E-03
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> eq	1,41E-03	2,24E-04	2,54E-03	7,78E-04
Aquecimento Global	kg CO <sub>2</sub> eq	-1,63E-01	6,75E-01	2,73E+00	2,63E+00
Camada de ozono	kg CFC-11 eq	3,64E-08	5,67E-11	2,25E-10	2,50E-10
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	1,75E-01	2,11E-02	1,24E-01	1,17E-01
Eco-tox. (água doce)	kg 1,4-DB eq	7,69E-02	7,38E-03	4,28E-02	3,77E-02
Eco-tox. (marinha)	kg 1,4-DB eq	3,98E+01	5,67E+00	3,49E+01	2,67E+01
Eco-tox. (terrestre)	kg 1,4-DB eq	4,56E-03	3,11E-05	2,23E-04	9,34E-03
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	4,19E-05	1,45E-04	4,68E-04	4,70E-04
Uso e ocupação do solo	m <sup>2</sup> ano	2,93E-01	1,87E-04	5,61E-04	7,05E-04

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>PLA (%)</b>	<b>PP (%)</b>	<b>PA66 (%)</b>	<b>PC (%)</b>
Recursos Abióticos	11,8	54,1	100	83
Acidificação	8,32	21,2	100	84,8
Eutrofização	55,6	8,83	100	30,6
Aquecimento Global	-5,97	24,7	100	96,3
Camada de ozono	100	0,156	0,619	0,688
Toxicidade humana	100	12,1	70,8	66,8
Eco-tox. (água doce)	100	9,6	55,7	49,1
Eco-tox. (marinha)	100	14,3	87,6	67
Eco-tox. (terrestre)	48,8	0,333	2,39	100
Oxidação fotoquímica	8,91	30,8	99,6	100
Uso e ocupação do solo	100	0,0638	0,191	0,24