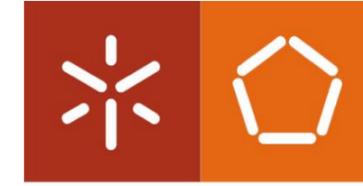




Análise de circularidade do produto em diferentes
estágios de conceção e produção no setor automóvel

Maria João Rocha Simão

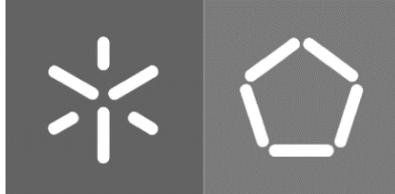
UMinho | 2023



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Maria João Rocha Simão

Análise de circularidade do produto em
diferentes estágios de conceção e produção
no setor automóvel



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Maria João Rocha Simão

**Análise de circularidade do produto em diferentes
estágios de conceção e produção no setor automóvel**

Dissertação

Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Ricardo João Ferreira Simões

Professora Doutora Carla Isabel Domingues Correia Martins

Engenheiro Tiago Barbosa

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

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

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

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

Agradecimentos

É com imensa gratidão que dedico este trabalho aos pilares que me sustentaram ao longo desta jornada desafiadora e na conclusão de um ciclo tão importante. Sem o apoio, motivação e amor de cada um de vocês, este marco não teria sido possível.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais e ao meu irmão, que foram e são o pilar mais importante da minha vida. Sempre acreditaram em mim e me incentivaram a nunca desistir, sendo o meu apoio constante, em qualquer que fosse o momento. Não existem palavras para expressar a minha gratidão!

Ao meu namorado, pelo apoio incondicional, paciência, compreensão e motivação constante nos momentos mais difíceis.

Não poderia deixar de agradecer às minhas melhores amigas, que sempre entenderam as minhas ausências em determinados momentos e me apoiaram em qualquer que fosse a minha inquietação.

À *Fehst Componentes*, que tão bem me recebeu e acolheu o meu projeto, reunindo sempre todas as condições de trabalho necessárias para o efetuar. Agradeço por acreditarem no meu potencial e contribuírem não só para o meu desenvolvimento profissional, como também pessoal. Agradeço também aos meus colegas de estágio, pela boa disposição, companheirismo e partilha de conhecimento que enriqueceram este trabalho.

Um agradecimento especial ao meu orientador da empresa, Engenheiro Tiago Barbosa, que de tudo fez para reunir todas as condições e dados necessários para que a realização deste trabalho fosse possível. Aos meus orientadores da universidade Professor Ricardo Simões, Professora Carla Martins e Joana Matos, por todo o tempo disponibilizado e pelo importante auxílio prestado durante a realização da dissertação.

A todos, expresso a minha mais profunda gratidão!

Obrigada!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização individual ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Nos últimos anos, a produção global de resíduos plásticos aumentou significativamente, resultado da forte correlação entre o aumento da urbanização, desenvolvimento económico e escassez de recursos naturais. Consequentemente, a importância em reduzir o uso de plásticos aumentou, devido à maior consciencialização no que toca aos efeitos prejudiciais que os plásticos podem ter no ambiente, nos oceanos e, até mesmo, na saúde humana. Neste contexto, setores como o automóvel, caracterizados por seguirem uma abordagem linear dos seus produtos, são um ótimo exemplo da necessidade de transição para uma economia circular, devendo procurar o desenvolvimento de processos mais ecológicos e sustentáveis, tanto por estratégia económica como pela mitigação do seu impacto ambiental.

Assim, têm surgido na literatura várias metodologias, de modo a auxiliar as empresas e instituições a implementarem a circularidade nos seus processos produtivos, como é o caso dos indicadores de circularidade.

A presente dissertação apresenta como principal objetivo a demonstração da pertinência do uso de indicadores de circularidade em estágios iniciais de desenvolvimento de um produto. Desta forma, pretende-se compreender a importância do seu papel neste âmbito e estabelecer comparação com um outro produto atualmente industrializado, de forma a verificar o impacto que determinadas ações e modificações podem ter na circularidade dos mesmos.

Com este objetivo em vista, foi necessária a recolha de dados relativos aos dois casos de estudo, para assim proceder ao cálculo dos indicadores de circularidade. Os indicadores para análise quantitativa selecionados foram, nomeadamente, o Índice de Desejabilidade de Reciclagem (RDI), o Indicador de Circularidade do Material (MCI), a Pontuação de Reutilização do Material (MRS), o Indicador de Eficiência de Recursos (VRE) e, por fim, ferramentas de análise qualitativa, como o Indicador Protótipo de Economia Circular (CEIP) e as Diretrizes de Design Circular (CDG). A aplicação destes indicadores permitiu distinguir as oportunidades de melhoria existentes para um produto ainda em desenvolvimento comparativamente a um produto industrializado.

Finalmente, foi ainda sugerida uma metodologia para promover o desenvolvimento de um produto mais sustentável, recorrendo à aplicação de indicadores de circularidade e discutidos os resultados obtidos para cada um dos casos de estudo.

Palavras-chave: Desenvolvimento do produto, Economia Circular, Indicadores de Circularidade, Produto Sustentável.

Abstract

In the last few years, the global generation of plastic waste has increased significantly, as a result of the strong correlation between increased urbanization, economic development and scarcity of natural resources. Consequently, the importance of reducing the use of plastics has increased, due to increased awareness of the harmful effects that plastics can have on the environment, oceans and even human health. In this context, sectors such as the automobile, characterized by following a linear approach to their products, are an excellent example of the need to transition to a circular economy, and should seek to develop more ecological and sustainable processes, both as an economic strategy and to mitigate its environmental impact.

Thus, several methodologies have emerged in the literature, in order to help companies to implement circularity in their production processes, as is the case of circularity indicators.

The main objective of this dissertation was to demonstrate the relevance of using circularity indicators in the initial stages of project development. In this way, the aim was to understand the importance of its role at an early stage of its development and a comparison was made with another currently industrialized product, to verify the impact that certain actions and modifications could have on improving their circularity.

To this end, it was necessary to collect all the informations relating to the two case studies, in order to proceed with the calculation of the circularity indicators. The selected indicators for quantitative analysis were, Recycling Desirability Index (RDI), Material Circularity Indicator (MCI), Material Reuse Score (MRS), Resource Efficiency Indicator (VRE) and, finally, qualitative analysis tools, such as the Circular Economy Prototype Indicator (CEIP) and the Circular Design Guidelines (CDG). The application of these indicators made it possible to distinguish the existing possibilities to improve a product still under development, compared to an industrialized product.

Finally, a methodology was also suggested to promote the development of a sustainable product using the application of circularity indicators and discussed results for each case study.

Keywords: Circular Economy, Circularity Indicators, Product development, Sustainable Product.

Índice

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. ESTADO DE ARTE.....	4
2.1 Consumo de plásticos no setor automóvel	4
2.2. Transição da economia linear para circular	6
2.3. Legislação associada aos plásticos na economia circular	10
2.4. Indicadores de circularidade.....	11
2.5. Desenvolvimento do produto	14
2.5.1. Etapas para o desenvolvimento de um produto na indústria automóvel.....	14
2.5.2. A fase de design no desenvolvimento de um produto.....	16
2.5.3. Importância da sustentabilidade no desenvolvimento de um produto	20
3. CARATERIZAÇÃO DA EMPRESA PARCEIRA	26
3.1. Visão e objetivos.....	27
3.2. Certificações da Empresa	27
3.3. Responsabilidade social e ambiental.....	28
3.4. Fluxos de matéria-prima na Fehst.....	29
4. DESENVOLVIMENTO.....	32
4.1. Caso de estudo 1	32
4.2. Caso de estudo 2	35
4.2.1. Desenvolvimento do produto.....	36
4.3. Seleção dos micro indicadores de circularidade para aplicação nos casos de estudo	46
4.3.1. Pontuação de Reutilização do Material (MRS).....	47
4.3.2. Índice de Desejabilidade de Reciclagem (RDI)	50

4.3.3.	Indicador de Circularidade do Material (MCI).....	53
4.3.4.	Indicador Protótipo de Economia Circular (CEIP)	55
4.3.5.	Indicador de Eficiência de Recursos Baseado no Valor (VRE)	57
4.3.6.	Diretrizes de design circular (CDG).....	58
5.	RESULTADOS.....	60
5.1.	Caso de estudo 1	60
5.1.1.	Pontuação de Reutilização do Material (MRS).....	60
5.1.2.	Índice de Desejabilidade da Reciclagem (RDI)	62
5.1.3.	Indicador de Circularidade do Material (MCI).....	64
5.1.4.	Indicador Protótipo de Economia Circular (CEIP)	68
5.2.	Caso de estudo 2	71
5.2.1.	Pontuação de Reutilização do Material (MRS).....	71
5.2.2.	Índice de Desejabilidade da Reciclagem (RDI)	73
5.2.3.	Índice de Circularidade do Material (MCI).....	76
5.2.4.	Diretrizes do Design Circular (CDG).....	79
6.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	80
6.1.	Comparação dos casos de estudo	80
6.2.	Metodologia para desenvolvimento de um produto com aplicação de indicadores de circularidade.....	85
7.	CONCLUSÕES	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
	ANEXOS.....	97
	ANEXO I – Fluxograma dos processos de fabrico na Fehst Componentes	97
	ANEXO II – Painel de instrumentos	98
	ANEXO III - Fluxograma do caso de estudo.....	99
	ANEXO IV - Tabela de tolerâncias dimensionais para peças plásticas	100

ANEXO V - Tabela de índice de segurança dos materiais.....	101
ANEXO VI – Cálculo do indicador RDI para o caso de estudo 1	102
ANEXO VII – Cálculos intermédios do indicador VRE para o caso de estudo 1	104
ANEXO VIII – Cálculo do indicador VRE para o caso de estudo 1	105
ANEXO IX – Cálculo do indicador RDI para o caso de estudo 2.....	106
ANEXO X – Cálculo do indicador CDG	108
ANEXO XI – Cálculo do indicador CDG	109

Índice de Figuras

Figura 1. Ciclos de recuperação técnica e biológica.....	8
Figura 2. Elementos importantes da economia circular.....	9
Figura 3. Categorização dos micro indicadores de circularidade	12
Figura 4. Fluxos de materiais nas organizações.....	13
Figura 5. Metodologia de desenvolvimento de produto na indústria automóvel.....	14
Figura 6. Metodologia proposta por Bruno Munari.....	17
Figura 7. Metodologia desenvolvida por Gui Bonsiepe.....	18
Figura 8. Metodologia desenvolvida por Karl T. Ulrich e Steven Eppinger	19
Figura 9. Metodologia para o desenvolvimento sustentável de um produto.....	21
Figura 10. Custo das alterações na fase de design e a sua influência no 3BL	23
Figura 11. Instalações da empresa Fehst Componentes.....	26
Figura 12. Fluxograma dos processos de fabrico na empresa	29
Figura 13. Dekorblende BFS RL.....	32
Figura 14. Borracha TPS	32
Figura 15. (a) Granulador de PC/ABS; (b) Rebarbagem térmica	33
Figura 16. Diferentes tintas utilizadas	34
Figura 17. Montagem das molas no produto	34
Figura 18. Consola central de um automóvel	36
Figura 19. Protótipo inicial do produto	37

Figura 20. Alterações executadas nos componentes 1 e 3.....	37
Figura 21. Protótipo final do produto.....	38
Figura 22. Apresentação de imagens da peça considerando: a) a separação dos dois componentes, guia e gap; b) a junção dos dois componentes, guia e gap.....	42
Figura 23. Montagem dos componentes	43
Figura 24. Equipamento de soldadura por ultrassons	43
Figura 25. Simulação do <i>Rear Crash Test</i>	45
Figura 26. Alteração da geometria do componente 4.....	46
Figura 27. Resultados obtidos para os diferentes cenários do indicador MRS.....	61
Figura 28. Pinça amperimétrica.....	66
Figura 29. Diagrama radar para o indicador CEIP	70
Figura 30. Resultados obtidos para os diferentes cenários do indicador MRS.....	72
Figura 31. Diagrama radar do indicador CDG.....	79
Figura 32. Metodologia utilizada para a inclusão da sustentabilidade no desenvolvimento do produto	86
Figura 33. Fluxograma dos processos de fabrico na Fehst Componentes.....	97
Figura 34. Localização do computador de bordo e airvent no painel de instrumentos.....	98
Figura 35. Fluxograma do caso de estudo 1	99
Figura 36. Tabela de tolerâncias dimensionais para produtos plásticos.....	100
Figura 37. Índice de segurança dos materiais	101
Figura 38. Gráficos da potência consumida na injetora e máquina de montagem	104
Figura 39. Dados da potência	104

Índice de Tabelas

Tabela 1. Dados importantes acerca do produto	35
Tabela 2. Seleção de matérias-primas de cada componente.....	40
Tabela 3. Definição de conceitos para aplicação do indicador MRS.....	48
Tabela 4. Níveis do indicador MRS.....	49
Tabela 5. Índice de avaliação de maturidade tecnológica.....	52
Tabela 6. Classificações do indicador CEIP	56
Tabela 7. Avaliação e critérios para a margem de melhoria	59
Tabela 8. Avaliação e critérios para a relevância.....	59
Tabela 9. Cenários para o indicador MRS.....	60

Tabela 10. Cálculo do índice de segurança dos materiais no produto	63
Tabela 11. Valores obtidos para o cálculo do RDI	63
Tabela 12. Dados utilizados no cálculo do MCI.....	64
Tabela 13. Valores obtidos nos cálculos intermédios e resultado do MCI	64
Tabela 14. Cenários elaborados para o indicador MCI.....	65
Tabela 15. Dados necessários ao cálculo do indicador VRE	67
Tabela 16. Resultados obtidos para o indicador VRE	67
Tabela 17. Resultados para o indicador CEIP.....	69
Tabela 18. Classificação e avaliação do produto.....	70
Tabela 19. Cenários para o indicador MRS.....	72
Tabela 20. Cálculo dos índices de segurança dos materiais constituintes do produto	74
Tabela 21. Resultados do indicador RDI para diferentes cenários	74
Tabela 22. Dados utilizados no cálculo do indicador MCI.....	77
Tabela 23. Valores obtidos nos cálculos intermédios	78
Tabela 24. Comparação dos casos de estudo 1 e 2	81
Tabela 25. Cálculo do fator: Energia	105
Tabela 26. Cálculo do fator: Serviços	105
Tabela 27. Cálculo do fator: Matéria-prima.....	105

Lista de abreviaturas e siglas

ABS - Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno

BCSD - Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável (Business Council for Sustainable Development)

C2C - Do berço ao berço (Cradle to cradle)

CC - Calculadora da Circularidade (Circularity Calculator)

CDG - Diretrizes de Design Circular

CEAP – Plano de Ação para a Economia Circular (Circular Economy Action Plan)

CEI - Índice de Economia Circular (Circular Economy Index)

CEIP - Indicador Protótipo de Economia Circular (Circular Economy Indicator Prototype)

CM – Matriz Combinação (Combination Matrix)

DEI - Índice de Esforço de Desmontagem (Disassembly Effort Index)

DSTR - Ferramentas de Apoio à Decisão para a Remanufatura (Decision Support Tool for Remanufacturing)

EC - Economia Circular

EDT - Tempo de Desmontagem Específico (Effective Disassembly Time)

EDIM - Métrica da Facilidade de Desmontagem (Ease of Disassembly Metric)

EOL – Fim de Vida (End of Life)

EOLI - Índice de Fim de Vida (End-of-life Index)

EOLI - DM - Índice de Fim de Vida Alinhado à Metodologia de Design (End-of-life Indices Design Methodology)

EPVR - Método de Design para a Recuperação de Valor de Produtos em Fim de Vida (Designed method for end-of-use product value recovery)

EEVC - Métodos de Criação de Valor Eco Eficiente (Eco-efficient Value Creation)

EVR - Indicador de Criação de Eco-Custos em Relação ao Valor (Eco-cost /value Creation)

EZWP - Modelo para a Expansão da Prática de Resíduos Zero (Model of Expanded Zero Waste Practice)

GWP – Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential)

LCA – Análise do Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment)

LFI - Índice de Fluxo Linear do Produto (Linear Flow Index)

LHD – Veículo de condução à esquerda (Left Hand Drive)

LI – Indicador de Longevidade (Longevity Indicator)

MCI - Indicador de Circularidade do Material (Material Circularity Indicator)

NOK - Não OK

MBDC - Química de design McDonough Braungart (McDonough Braungart Design Chemistry)

MRS - Pontuação de Reutilização do Material (Material Reutilization Score)

MSI - Nível de segurança do material (Material Security Index)

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

OEM – Fabricante do Equipamento Original (Original Equipment Manufacturer)

PA - Poliamida

PC/ABS - Policarbonato/Acrilonitrilo - Butadieno – Estireno

PLCM – Métrica de Nível de Circularidade do Produto (Product-level Circularity Metric)

PP – Polipropileno

PR- MCDT - Ferramenta de Decisão Multicritério da Recuperação do Produto (Product Recovery Multi-criteria Decision Tool)

PU – Poliuretano

PVC - Policloreto de Vinil

RDI - Índice de Desejabilidade da Reciclagem (Recycling Desirability Index)

REPRO2 - Remanufatura do Perfil de Produto (Remanufacturing Product Profiles)

RHD – Veículo de condução à direita (Right Hand Drive)

RI - Índice de Reciclagem (Recycling Indices)

RPI - Indicador Potencial de Reutilização (Reuse Potencial Indicator)

SDEO - Indicador para o Design Sustentável e Opção de EOL (Mathematical model to assess sustainable design and end-of-life options)

SICE – Indicadores de Sustentabilidade na Economia Circular (Sustainability Indicators in EC)

TMR – Necessidade Total de Materiais (Total Material Requirement)

TPE - Elastómero Termoplástico

TPQ - Tipologia para as Propriedades da Qualidade (Typology for Quality Properties)

TRL - Nível de prontidão tecnológica (Technology Readiness Level)

TPS – Estireno Termoplástico

VRE - Indicador de Eficiência dos Recursos Baseados no Valor (Value-Based Resource Efficiency Indicator)

WBCSD - Conselho empresarial mundial para o desenvolvimento sustentável (World Business Council for Sustainable Development)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Recentemente tem sido testemunhado um aumento alarmante na geração de resíduos plásticos em todo o mundo. Este aumento vertiginoso é resultado de uma complexa interação entre diversos fatores que influenciam os padrões de consumo, a produção industrial e a gestão de resíduos.

Uma das principais razões para este aumento, reside na dependência crescente dos plásticos na vida diária do ser humano. Isto pelo facto de os plásticos serem extremamente versáteis, leves, duráveis e de baixo custo, tornando-os a escolha perfeita para uma variedade de produtos, desde embalagens, passando pela indústria automóvel até à eletrónica. No entanto, a produção em massa de produtos utilizando matéria-prima virgem, exige enormes quantidades de recursos naturais, intensificando a pressão sobre a natureza e acelerando a escassez de recursos [1].

Para enfrentar este desafio complexo, é fundamental nos dias de hoje, considerar aspetos como a inclusão de medidas circulares para os produtos, bem como incentivos económicos para a adoção destas práticas e, sobretudo, o reforço na regulamentação ou políticas governamentais que incentivem ou exijam as mesmas.

Felizmente, este tópico tem sido cada vez mais discutido, o que tem impulsionado a mudanças no que toca à consciência cívica e conduzido a uma sociedade que ambiciona assegurar um planeta melhor para as próximas gerações. É neste sentido que surge a necessidade de transição da economia linear para circular, que se refere sobretudo à transformação do modo como são produzidos, consumidos e geridos os recursos. De um modo geral, enquanto a atual economia linear segue um padrão de "produzir, usar e descartar", a economia circular adota um ciclo contínuo de recursos, em que os materiais são mantidos em uso pelo maior tempo possível, reduzindo o desperdício e minimizando os impactos ambientais [2].

Assim, para aferir se está a ser seguido o caminho para a circularidade, é necessário medir o quão eficaz é fazer a transição de linear para circular, tornando-se relevante a utilização de ferramentas de medição de práticas circulares, como é o caso dos indicadores de circularidade. Estes indicadores focam-se em medir a progressão desta transição, permitindo avaliar o desempenho e eficácia de sistemas, processos e produtos na direção da economia circular [3].

É neste contexto e da necessidade de incorporar princípios de economia circular desde o início do processo de design e desenvolvimento de produto, que surge o tema da presente dissertação.

Estudar a circularidade para um produto em desenvolvimento é de extrema importância uma vez que acarreta uma série de benefícios ambientais, económicos e sociais. Desta forma, o cálculo dos indicadores de circularidade neste tipo de produtos em fase de desenvolvimento, ajuda a proceder à avaliação do quão eficientes e sustentáveis estes serão ao longo do seu ciclo de vida, garantindo um leque de oportunidades de melhoria do mesmo, ainda numa fase anterior à de produção.

De forma a acompanhar a equipa de desenvolvimento de produto e documentar todas as alterações sofridas pelo mesmo, a presente dissertação foi elaborada em contexto empresarial, na *Fehst Componentes*, uma empresa fornecedora de componentes plásticos, maioritariamente para o setor automóvel. O principal intuito da execução deste trabalho foi o de consciencializar a empresa para a circularidade dos seus produtos e processos produtivos, na tentativa de implementar um método mais circular no desenvolvimento dos mesmos.

1.2. Objetivos

O principal objetivo da dissertação prende-se pela demonstração da pertinência do uso de indicadores de circularidade em estágios iniciais de desenvolvimento de um produto. Desta forma, pretende-se perceber a importância do papel dos indicadores para um produto em desenvolvimento e estabelecer a comparação com um outro que se encontre atualmente em produção em série, numa tentativa de verificar o impacto que determinadas ações e modificações poderão ter na circularidade de ambos. Esta comparação é realizada, precisamente, para proporcionar uma análise mais robusta através dos indicadores de circularidade e assim ser estabelecida uma relação adequada entre os mesmos.

Os principais objetivos a alcançar através do desenvolvimento da dissertação são:

- Cálculo dos indicadores de circularidade mais pertinentes para dois produtos do setor automóvel, um em fase de desenvolvimento e outro atualmente em produção na empresa;
- Criação de cenários de melhoria da circularidade para cada um dos produtos selecionados;
- Sugestão dos diferentes cenários previamente estudados ao departamento de desenvolvimento, com possíveis alternativas a serem executadas no produto;
- Proposta de uma metodologia de desenvolvimento de um produto sustentável recorrendo à aplicação de indicadores de circularidade.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se subdividida em 7 Capítulos, sendo o seu conteúdo descrito em seguida.

No primeiro capítulo é dado a conhecer o enquadramento do projeto, bem como a descrição dos objetivos pretendidos para o mesmo.

O segundo capítulo refere-se ao estado de arte, em que é revista a bibliografia relevante ao tema, incluindo uma contextualização aos indicadores de circularidade, bem como uma abordagem à sustentabilidade no desenvolvimento do produto.

No que diz respeito ao terceiro capítulo, é efetuada a caracterização da empresa onde o projeto foi realizado, nomeadamente em termos de fluxos de matéria-prima, responsabilidade ambiental e as suas certificações.

O quarto capítulo aborda a seleção dos casos de estudo, fazendo referência aos dados mais importantes correspondentes a cada um dos mesmos, de forma a facilitar o posterior cálculo dos indicadores de circularidade. Neste capítulo são também selecionados os indicadores a calcular e apresentada a metodologia de cálculo.

Relativamente ao quinto capítulo, são apresentados os resultados obtidos para cada indicador, bem como a análise dos mesmos e a proposta de cenários.

No sexto capítulo são discutidos e comparados os resultados para cada um dos casos de estudo e apresentada uma metodologia para o desenvolvimento de um produto com a aplicação dos indicadores de circularidade.

Por fim, no que concerne ao sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões acerca do estudo efetuado.

2. ESTADO DE ARTE

2.1 Consumo de plásticos no setor automóvel

O uso de plástico na sociedade moderna cresceu bastante nas últimas décadas. Uma das evidências disso é que, nos dias de hoje, é extremamente difícil encontrar ou interagir numa base diária com algo que não seja feito ou que não contenha um ou mais tipos de plástico. Em duas décadas, o crescimento do volume de plástico ultrapassou o crescimento económico em quase 40%, com a produção anual de plástico a passar de 234 milhões de toneladas em 2000 para 460 milhões de toneladas em 2019 [1].

Este aumento de produção e utilização de plásticos refletiu-se numa maior compreensão e conhecimento sobre o seu comportamento, permitindo assim um melhor controlo das suas propriedades que, conseqüentemente, impulsionou o desenvolvimento de um grande número de novos polímeros [4].

Os plásticos desempenham um papel muito útil na sociedade, tendo aplicações essenciais em diversos setores da economia, de entre os quais a indústria automóvel, que nos últimos anos, viu o seu crescimento aumentar exponencialmente. A utilização dos plásticos no ramo automóvel proporcionou uma redução significativa na massa do veículo, que para além de promover a eficácia no consumo de combustível, diminuiu também as emissões de gases com efeito de estufa. Além disso, as peças plásticas não são propensas à corrosão, oferecem flexibilidade e resiliência, possuem ótimo isolamento térmico, reduzem o ruído e permitem a liberdade de design [5].

O plástico é, portanto, um dos principais materiais necessários para compor a estrutura, o desempenho e a segurança dos automóveis, constituindo nos dias de hoje, cerca de 1/3 da massa de um veículo, sendo a produção anual média mundial de automóveis e veículos comerciais cerca de 85 - 95 milhões de toneladas [5]. As peças plásticas usadas na indústria automóvel são, na sua maioria, moldadas por injeção para o fabrico de vários componentes, tais como painéis, porta-luvas, para-choques, botões, puxadores de portas, sendo os plásticos mais comumente utilizados provenientes de polímeros como: polipropileno (PP), poliuretano (PU), poliamida (PA), policloreto de vinil (PVC) e policarbonato/acrilonitrilo - butadieno - estireno (PC/ABS).

O grande desafio da reciclagem dos plásticos utilizados no setor automóvel advém do seu reforço com fibras (como fibra de vidro, carbono) ou misturas de plástico (por exemplo, compostos de PP e TPE), bem como peças moldadas por bi-injeção de dois ou mais materiais [5]. Desta forma, os plásticos no final do seu ciclo de vida estão frequentemente contaminados com diversos tipos de polímeros,

componentes metálicos e por vezes resinas, o que implica que existam tecnologias de reciclagem para este tipo de materiais, caso contrário, estes produtos são enviados para aterro.

A sustentabilidade tornou-se assim um propósito cada vez mais importante, particularmente para a indústria automóvel, que transita gradualmente para alternativas mais sustentáveis. Esta visão ambientalmente consciente é notória neste setor, onde os impactos da atividade industrial, diretos e indiretos, são frequentemente percecionados como nefastos para o ambiente. Assim, este setor atravessa uma fase de grandes transformações que implicam a adoção de novas metodologias para promover a sustentabilidade, reduzir a quantidade de resíduos produzidos ao longo do processo e mitigar os impactos ambientais derivados da produção de veículos [6].

Um exemplo prático de investimento nesta área é o Oryzite, um material renovável e sustentável, produzido a partir da casca do arroz, que está atualmente a ser usado em protótipos de revestimentos do SEAT Leon, substituindo componentes em plástico. Das mais de 700 milhões de toneladas de arroz colhidas no mundo anualmente, 20% correspondem à casca, ou seja, cerca de 140 milhões de toneladas acabam por não ter aproveitamento. Este é apenas um dos projetos de investigação em curso, baseados na promoção da economia circular, que a SEAT está a desenvolver. A SEAT é uma marca pioneira no uso de materiais sustentáveis e na aplicação de protocolos ambientais, e aposta no desenvolvimento de novos materiais a partir de resíduos da indústria alimentar como uma das chaves para tornar a produção automóvel mais ecológica [6].

Desta forma, pode concluir-se que, embora a indústria automóvel nunca seja completamente circular, deve estabelecer medidas para aumentar o seu grau de circularidade. Constata-se, assim, que a evolução sustentável desta área implica a substituição de matérias-primas, a minimização da quantidade de matéria virgem utilizada, a incorporação de material reciclado, o recurso a tecnologias mais desenvolvidas e verdes, a redução da quantidade de resíduos produzidos ao longo de todo o processo, entre outras medidas que assegurem a diminuição da pressão ambiental associada à extração excessiva de recursos, produção, consumo e desperdício.

2.2. Transição da economia linear para circular

O atual sistema económico linear, caracterizado pela desvalorização e não reaproveitamento dos resíduos plásticos no final da sua vida útil, é uma das principais causas do esgotamento de recursos naturais [7]. O conceito de economia linear, é baseado no princípio “extração de recursos não-renováveis, produção, distribuição, consumo e geração de resíduos” e incorre em perdas desnecessárias de recursos que são descartados após o seu uso [8]. Este processo é caracterizado pelo fluxo unidirecional de material, em que as matérias-primas são transformadas no produto final e, posteriormente, em resíduos descartáveis [9].

Atualmente, são extraídos cerca de 92 mil milhões de toneladas de recursos anualmente, dos quais 75% são de origem fóssil, colocando pressões acentuadas sobre os ecossistemas e na sua capacidade de regeneração natural [10].

A persistência na prática deste sistema extrativo apresenta diversos riscos, nomeadamente a escassez de recursos, a aceleração das alterações climáticas e eventuais interrupções das cadeias de abastecimento. Face a este panorama, o tema da circularidade tornou-se um conceito apelativo na atualidade e começou a ser debatido como um novo modelo para gerir os limites à disponibilidade de recursos e, simultaneamente, uma nova e equilibrada forma de crescimento económico [10].

Na procura por um ecossistema mais sustentável, de baixo carbono e eficiente em recursos, surgiu o modelo de economia circular. A origem do conceito de economia circular é difícil de rastrear. No entanto, alguns estudos na literatura sobre a Economia Ambiental e Ecológica apontam para Pearce e Turner (1990) [11], como os principais economistas que introduziram o conceito de “circularidade” e analisaram a interdependência entre o meio ambiente e o sistema económico. Estes autores associam a transição do sistema económico linear para circular às leis da termodinâmica, segundo a qual, numa primeira formulação assume que num sistema fechado, o total de energia é constante. O objetivo passa por obter um balanço nulo, entre o consumo de recursos e libertação de resíduos. Isso implica a capacidade de executar ciclos fechados integrados que garantam um processo de reciclagem contínuo, evitando o uso de recursos virgens, substituídos por matérias-primas secundárias [12].

Os conceitos de economia circular possuem raízes ecológicas e a sua natureza regenerativa/restauradora pressupõe ao paradigma proposto pelo conhecido trabalho “Cradle to Cradle” de McDonough e Braungart [13], que promovem a evolução da eco-eficiência para a eco-eficácia. Este foi um dos principais pilares da economia circular, que destacou a importância de criar um processo em que o design inteligente seja usado para conseguir prolongar ou melhorar o ciclo de vida dos produtos.

Este conceito pode ser conseguido através da conceção de produtos e processos que tenham em consideração a vida do produto, contrariamente à vida útil que lhe foi projetada [14].

No caso dos materiais poliméricos, este sistema económico circular surge como uma solução para a crise ambiental pela qual os plásticos estão a atravessar na atualidade [15]. A economia circular, por contraposição à economia linear, pode ser definida como um sistema regenerativo, em que a entrada de recursos, a produção de resíduos e as perdas de energia são minimizadas pela desaceleração, redução e fecho dos ciclos de materiais e energia. A economia circular preconiza, assim, que a magnitude dos fluxos de materiais e energia, entre o ambiente e a economia se deve minimizar à custa de um aumento da circulação mais continuada dos fluxos dentro da economia, reduzindo a atual dependência do ambiente [16].

Assim, em contraste com o sistema de ciclo aberto da economia linear, onde os recursos se tornam resíduos no final da sua vida útil, no modelo de economia circular os recursos são um *input* para novos processos, reduzindo a necessidade de matéria-prima virgem em novos ciclos de produção [17]. Portanto, a transição para uma economia circular é um contributo essencial para desenvolver uma economia sustentável, eficiente em termos de recursos, competitiva e de baixas emissões de carbono [18].

Historicamente, a economia circular caracteriza-se por seguir o princípio dos 3R's: reduzir, reutilizar e reciclar, ou seja, a utilização de recursos é reduzida, a reutilização dos produtos é maximizada e a matéria-prima é reutilizada e reciclada na incorporação de novos produtos.

A economia circular envolve geralmente cinco fases principais: a entrada de material, o design, a produção, o consumo e, finalmente, o fim de vida. Estas fases representam os processos cujos desempenhos devem ser medidos para avaliar o quão circular é o sistema global em análise [9].

Segundo a Ellen MacArthur Foundation existem 4 principais pilares para a adoção da economia circular, sendo estes [9]:

- **Projeto e produção de produtos circulares:** Nesta categoria estão incluídas ações desde métodos de design ecológico para facilitar a reutilização, renovação e reciclagem, até à conceção de produtos e processos com menos substâncias perigosas;
- **Novos modelos de negócio:** A transição para uma economia circular requer modelos de negócio inovadores que substituam os existentes ou ajudem a capturar novas oportunidades. As empresas detentoras de uma fatia significativa do mercado podem desempenhar um papel importante na inovação da economia circular;

- **Ciclos em cascata:** Nesta categoria serão necessárias tecnologias inovadoras para o aproveitamento de materiais em múltiplos ciclos e o seu retorno final ao solo ou ao sistema de produção industrial. Isto envolve logística da cadeia de entrega, separação, armazenamento, gestão de risco, geração de energia, e até mesmo biologia molecular e química orgânica de polímeros.
- **Ciclo cruzado e colaboração intersetorial:** Para aumentar a reutilização de materiais e a maior produtividade de recursos, o mercado deve desempenhar um papel central, com o apoio de políticas públicas e instituições de ensino. Desta forma, torna-se necessário garantir as condições favoráveis do sistema para esta transição, através de incentivos económicos, o estabelecimento de regras ambientais adequadas e a colaboração intersetorial.

Além destes quatro pilares, a Ellen MacArthur Foundation, distingue dois ciclos diferentes para a economia circular: um ciclo biológico, em que os materiais biodegradáveis são devolvidos à terra através de processos como a compostagem e digestão anaeróbica, e um ciclo técnico, no qual os produtos, componentes e materiais são reparados, reutilizados, remanufaturados ou reciclados (em última instância), permanecendo no mercado durante o máximo de tempo possível [2]. É importante notar que a oferta dos recursos de base biológica não é ilimitada e que estes recursos devem ser provenientes de fontes geridas de forma sustentável. A Figura 1 representa o diagrama de sistemas da economia circular, onde a verde, estão representados os ciclos biológicos e a azul, os diferentes fluxos técnicos [19].

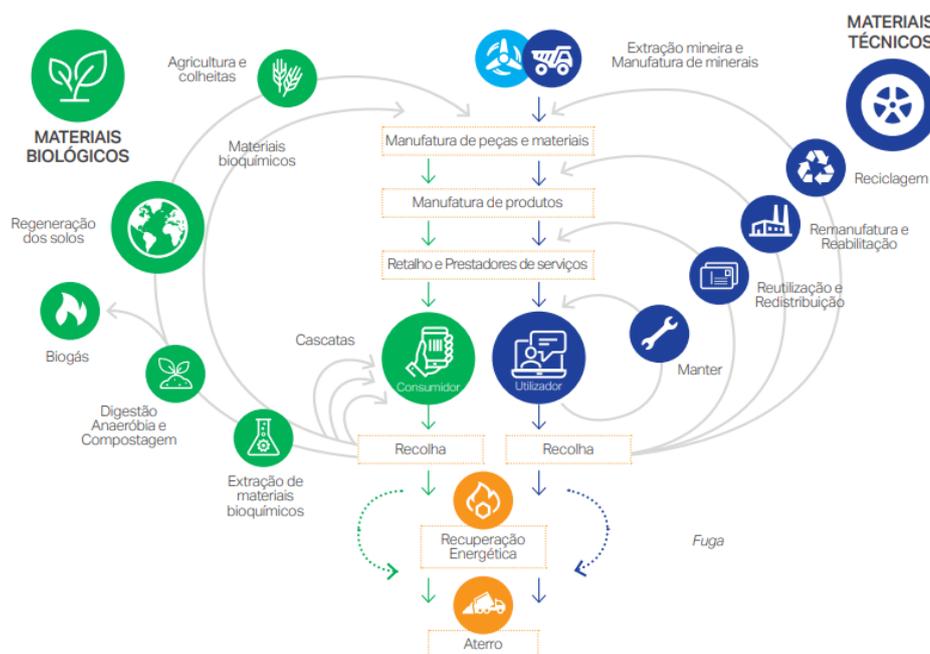


Figura 1. Ciclos de recuperação técnica e biológica [37]

Contudo, a economia circular não requer apenas ciclos fechados de materiais, mas também elementos fundamentais como o pensamento sistêmico, que tem em consideração as ligações entre empresas, pessoas e organismos, a transição para as energias renováveis, o design circular para facilitar a reutilização, reciclagem e o aproveitamento dos produtos em múltiplos ciclos, entre outros [2]. A Figura 2 demonstra os elementos mais importantes para a economia circular.

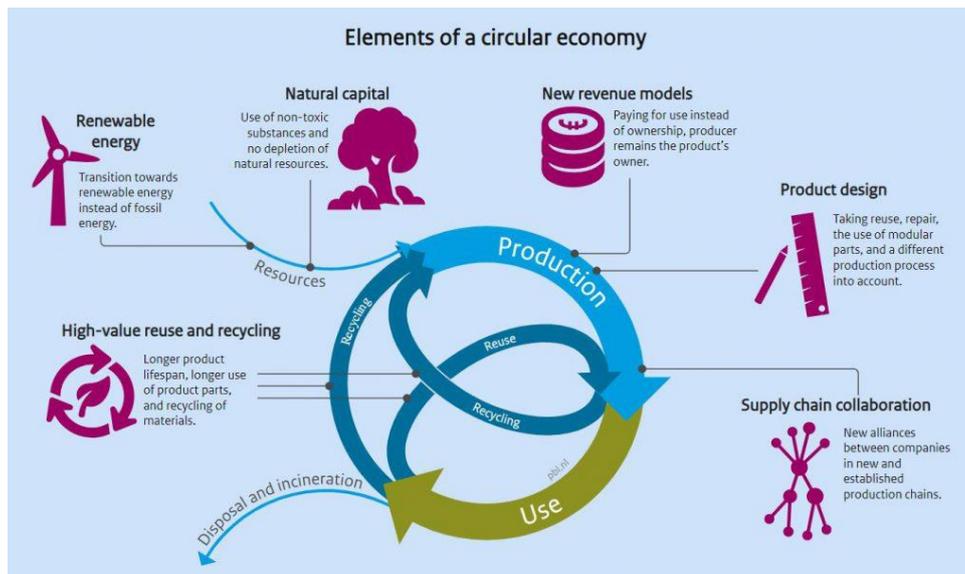


Figura 2. Elementos importantes da economia circular [68]

A transição gradual e transformadora para a economia circular proporciona vantagens evidentes para as empresas, desde o aumento de rentabilidade dos processos de produção e proteção das flutuações dos preços dos recursos, até à oportunidade de reinvenção e desenvolvimento de um novo leque de modelos de negócio sustentáveis e regenerativos que coloquem a empresa mais próxima do consumidor e mais competitiva.

Apesar dos benefícios que oferece, a economia global está classificada como apenas 8,6% circular, o que demonstra que as práticas atuais no sentido da desmaterialização e eficiência de recursos não são suficientes, o que destaca a urgência de visitar a estratégia e acelerar a mudança [10].

2.3. Legislação associada aos plásticos na economia circular

Embora a economia circular seja um modelo económico que proporciona oportunidades a empresas de vários setores, a transição para uma economia circular não é um processo propriamente simples. As empresas têm de alterar os seus modelos de negócio, adaptar as suas estratégias e reforçar as competências dos seus colaboradores, enquanto os governos têm de desenvolver políticas de incentivo para a economia circular [19].

Com a proliferação do esgotamento de recursos, alguns governos e instituições, como a União Europeia e a Ellen MacArthur Foundation, pretendem adotar o novo modelo económico circular, uma vez que este permite manter os recursos em uso durante o maior tempo possível, extrair o máximo de valor durante o seu uso e recuperar e regenerar os produtos e materiais no final de cada vida útil. Nesse sentido, existe a necessidade por parte da comunidade europeia de implementar objetivos e metas adaptáveis às mesmas. A nova estratégia da Comissão Europeia propõe ações destinadas a tornar realidade a visão de uma economia de plásticos mais circular, tendo aprovado novas metas de reciclagem de plásticos para um mínimo de 50% até ao final de 2025 e um mínimo de 55% até ao final de 2030, através da introdução de mudanças a nível de design e produção de plásticos [18].

A Ellen MacArthur Foundation é uma instituição que trabalha para acelerar a transição para a economia circular. Esta fundação desenvolve e promove o conceito de economia circular e trabalha com empresas, academias e decisores políticos para mobilizar soluções e sistemas à escala global. Segundo a Ellen MacArthur Foundation, o modelo económico linear está a atingir os seus limites físicos e a economia circular é uma alternativa atraente que procura redefinir a noção de crescimento, com benefícios para toda a sociedade [20]. Este modelo económico baseia-se em 3 princípios: i) eliminar resíduos e poluição desde o princípio; ii) manter os produtos e materiais em uso durante o maior tempo possível; iii) regenerar sistemas naturais.

A Comissão Europeia adotou também um novo plano de ação dedicado à economia circular (CEAP) em março de 2020. O *European Green Deal* ou Pacto Ecológico Europeu é um conjunto de medidas para o crescimento sustentável, que ajuda a reduzir a pressão sobre os recursos naturais e gera crescimento sustentável e emprego, de forma a não sobrecarregar a natureza. Este plano é também um dos pré-requisitos para alcançar a neutralidade carbónica da União Europeia até 2050 e para travar a perda de biodiversidade. O novo plano de ação anuncia iniciativas ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos, visa a forma como os produtos são concebidos, promove processos de economia circular, encoraja o consumo sustentável e pretende assegurar que os resíduos sejam evitados e os recursos utilizados sejam mantidos na economia da UE durante o máximo de tempo possível [21].

Entre estas medidas, destaca-se também o Pacto Europeu para os Plásticos que visa colmatar as lacunas das iniciativas e dos acordos existentes, especialmente nas fases de conceção e de produção do ciclo de vida dos plásticos. Este acordo reúne todas as partes interessadas tendo em vista alcançar o objetivo global de eliminar a dispersão de plástico no ambiente. Desta forma, foi definido um conjunto de metas ambiciosas até 2025, que passam pela: redução dos produtos e embalagens de plástico virgem, aumento da capacidade de recolha, triagem e reciclagem de plásticos de uso único, melhorar o uso de plásticos reciclados e tornar reutilizáveis as embalagens plásticas e produtos plásticos descartáveis, sempre que possível [22].

2.4. Indicadores de circularidade

A implementação dos princípios da economia circular em contexto empresarial refere-se à minimização dos impactos ambientais, sociais e económicos negativos decorrentes da sua atividade, com o objetivo de criar impactos positivos. Para tal, assenta numa abordagem do ciclo de vida do produto, internalizando boas práticas a todos os níveis da estrutura interna da empresa. Mais do que uma estratégia de marketing, a sustentabilidade deve ser encarada como um incentivo à inovação e resiliência da empresa, sendo isso cada vez mais relevante como forma de alcançar os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Para aferir se uma empresa segue o caminho da economia circular, é necessário medir o quão eficaz é fazer a transição de linear para modelos circulares e verificar se as ações da empresa trazem os efeitos económicos, ambientais e sociais pretendidos [23]. Nesse sentido, são necessárias ferramentas que apoiem as tomadas de decisão em relação a práticas mais circulares, bem como de monitorização da transição para este modelo económico. Assim, torna-se relevante a utilização de ferramentas de medição de práticas circulares como é o caso dos indicadores de circularidade [24].

Os indicadores de circularidade, têm como objetivo o rastreamento, monitorização e medição do progresso associado às metas e objetivos definidos na transição para a economia circular, através de avaliações quantitativas ou qualitativas. Assim, pode dizer-se que a sua finalidade é a de fornecer informações objetivas e credíveis sobre o estado dessa transição, de forma a avaliar e documentar a evolução da economia circular [24].

Em relação às suas dimensões, os indicadores distribuem-se por três níveis, sendo eles macro, meso ou micro. Os indicadores a nível macro têm como foco as trocas (materiais) entre a economia e o ambiente, comércio internacional e acumulação de material nas economias nacionais. Os indicadores a nível meso ajudam a descrever o desempenho económico, ambiental ou social de uma região, grupo de

produtos ou indústria. Finalmente, os indicadores a nível micro, foco do presente trabalho, fornecem informações detalhadas para processos de decisão ao nível empresarial ou local, produtos individuais ou comportamentos de consumo. Estes indicadores apoiam a implementação de políticas e decisões em áreas como as políticas de produto, eficiência energética, gestão integrada de resíduos e de educação ambiental. Ajudam a descrever o desempenho económico, ambiental ou social de produtos, empresas ou consumidores [16],[25].

Estes micro indicadores oferecem maior especificidade, uma vez que tratam de produtos específicos e focam-se em diferentes aspetos da economia circular, desde a reciclagem, reutilização, gestão de fim-de-vida, desmontagem, reparação e eficiência de recursos. De acordo com diferentes autores, existem atualmente mais de uma centena de micro indicadores de circularidade na literatura, tendo alguns destes sido distribuídos por diferentes categorias de economia circular, como demonstrado na Figura 3 [26], [27].

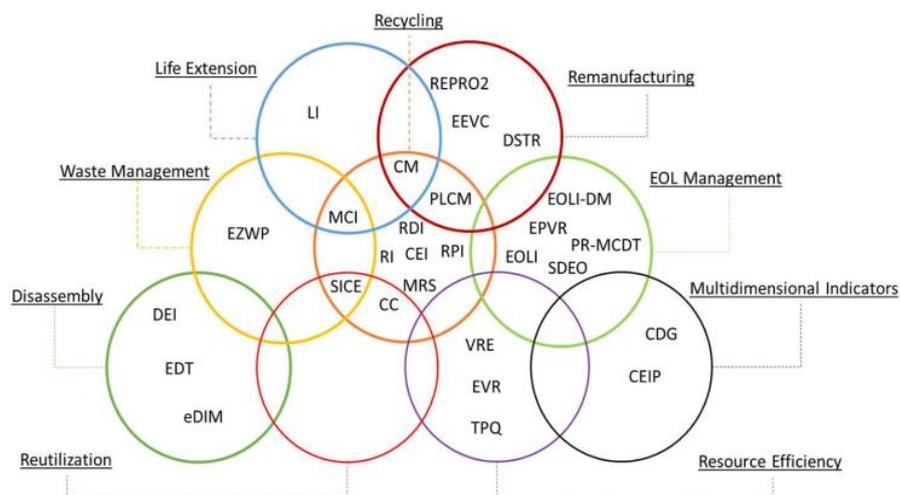


Figura 3. Categorização dos micro indicadores de circularidade [26]

Os indicadores mostram uma divergência significativa em termos das estratégias da economia circular que têm em foco e dos fluxos e processos que capturam. A maioria dos indicadores possuem um único foco, ou seja, têm apenas uma estratégia, contudo, existe também um número significativo de indicadores multifocais, o que significa que consideram várias estratégias de economia circular em simultâneo. As duas estratégias mais comuns de economia circular contabilizadas pelos indicadores são a reciclagem de materiais e a redução das perdas de produção, sendo a reciclagem o foco único de alguns dos indicadores e também abordada por todos os indicadores multifocais. Em geral, os indicadores com um único foco captam menos recursos e uma parte mais pequena do sistema de

produtos, enquanto os multifocais são responsáveis pelo sistema de produtos de forma mais abrangente, por exemplo, a maioria dos indicadores de reciclagem de materiais avaliam apenas a fase de fim de vida, enquanto os indicadores multifocais abordam as várias fases do ciclo de vida [28].

A avaliação dos indicadores de circularidade é iniciada pela análise dos fluxos de materiais ao longo da organização e tem como objetivo assegurar a capacidade das empresas para minimizar a utilização de recursos e potenciar o aproveitamento dos resíduos. Esta avaliação implica perceber o nível de circularidade dos materiais que a organização utiliza, identificar de que forma a organização desenha e processa os materiais no sentido de assegurar que sejam recuperados no final do processo produtivo e perceber o nível de recuperação atual da organização através de diferentes mecanismos, depois dos materiais saírem das instalações, seja em forma de produto, subproduto ou resíduo [16]. A Figura 4 representa os fluxos de materiais nas organizações.

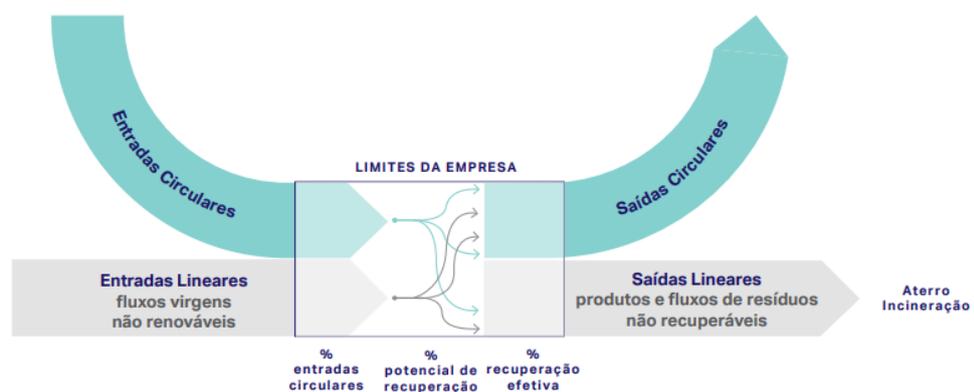


Figura 4. Fluxos de materiais nas organizações [16]

2.5. Desenvolvimento do produto

2.5.1. Etapas para o desenvolvimento de um produto na indústria automóvel

O processo de desenvolvimento de um produto é uma sequência de passos ou atividades que uma empresa utiliza para conceber, desenhar e comercializar um produto [29]. A maioria dos processos de desenvolvimento de produto variam de empresa para empresa dependendo do setor, dimensão da empresa, complexidade do produto, entre outros fatores. Desta forma, cada organização personaliza o seu próprio processo para atender às suas necessidades específicas.

No caso da indústria automóvel, o desenvolvimento de produto envolve uma série de características e requisitos essenciais para garantir a conformidade do produto final.

Inicialmente, é fundamental compreender as necessidades e preferências dos consumidores, sendo o produto capaz de atender à evolução tecnológica de forma a produzir algo inovador.

Os componentes internos de um veículo devem também atender a rigorosos padrões de segurança, sendo capazes de proteger os ocupantes contra quebras e estilhaçamentos, lesões devido a peças mal projetadas, etc. Desta forma, o desenvolvimento de um produto para a área automóvel requer testes rigorosos para garantir a sua fiabilidade, durabilidade e segurança. De entre os mesmos, podem ser realizados testes de colisão, testes de resistência, testes de desempenho, etc.

O design das peças representa igualmente um papel fundamental para os consumidores, devendo este aliar uma estética agradável à sua funcionalidade.

Por último, um fator de elevada importância para o presente trabalho e que será discutido mais adiante, situa-se na sustentabilidade deste tipo produtos. Cada vez mais existem preocupações com o meio ambiente, como a redução de resíduos, a reciclagem de materiais, sendo para tal necessária a abordagem desta temática no desenvolvimento de novos produtos.

Para compreender a metodologia de desenvolvimento de produto usual na indústria automóvel, foram alocadas de forma cronológica as suas fases constituintes (Figura 5) [29].

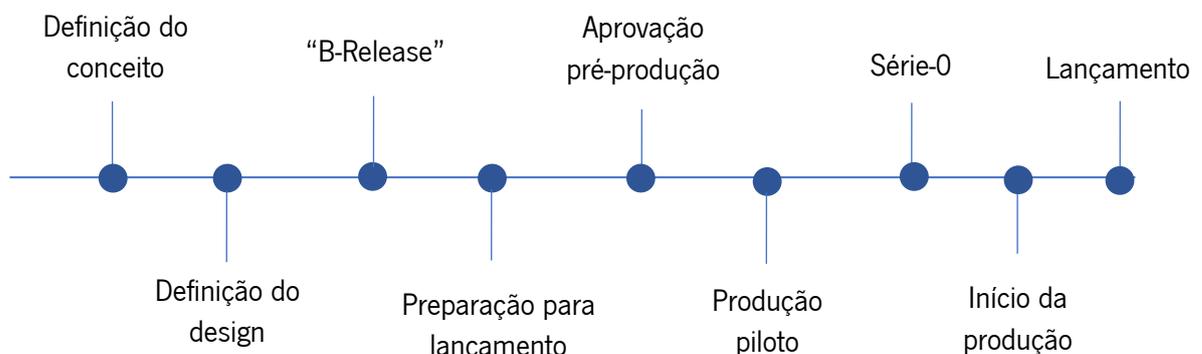


Figura 5. Metodologia de desenvolvimento de produto na indústria automóvel [29]

Este processo inicia com a fase de “Definição do conceito”, uma fase crucial para estabelecer as bases do projeto, garantir que o produto atende às necessidades do mercado, seja viável tecnicamente e esteja alinhado com os objetivos da organização. A fase seguinte, corresponde à definição do design de todas as superfícies, os aspetos funcionais e ergonómicos. Nesta fase, são gerados protótipos virtuais, selecionadas as matérias-primas, é verificada a viabilidade de produção com base em simulações, planeado o método de produção e é dado início ao design das ferramentas de produção, equipamentos de produção e equipamentos de teste.

A fase denominada por “B-Release”, corresponde aos seguintes processos: aquisição ou produção de ferramentas de produção, máquinas, equipamentos de produção e teste. É também dado início à produção de amostras e à testagem das mesmas.

No que diz respeito à fase “Preparação para lançamento”, esta tem como objetivo garantir o início da produção e ao mesmo tempo definir ações a serem tomadas no caso de desvios em relação às metas estabelecidas. Além disso, é verificada a estratégia de produção através de testes com protótipos.

Relativamente à fase de “Aprovação pré-produção”, o seu objetivo passa por fabricar o produto utilizando os equipamentos de produção, com o intuito de os otimizar. Além disso, é verificada a estabilidade dimensional do mesmo. Este processo visa aumentar a prontidão da produção, identificando e eliminando problemas.

De seguida, no que toca à fase de “Produção piloto”, é fabricada uma série limitada de produtos, com o objetivo de testar e validar todo o processo de produção nas suas condições reais, antes do início da produção em massa. A produção piloto é uma oportunidade para identificar problemas e testar a funcionalidade dos equipamentos de produção e montagem, a fim de confirmar a capacidade do processo. Além disso, com base nestes resultados, podem ser executados ajustes no design do produto, materiais, especificações ou tolerâncias.

Por conseguinte, a fase "Série-0" envolve a instalação das peças e conjuntos no veículo, com atenção especial para o ajuste e estabilidade dimensional das mesmas. Esta etapa serve assim para validar a transição do processo de produção para a produção em série.

No início da fase de produção ou designada de fase de industrialização, ocorre a formação da mão-de-obra e a resolução de problemas remanescentes nos processos de produção. Normalmente, a transição desta fase para a de produção em série é executada gradualmente.

Dado o início à produção em série, a certa altura, o produto é lançado e torna-se disponível no mercado, podendo ainda ocorrer uma revisão do projeto após o lançamento da produção. Esta avaliação

poderá ser realizada tanto do ponto de vista comercial como técnico e destina-se a identificar formas de melhorar o processo de desenvolvimento para projetos futuros [29].

De notar que todas estas etapas são iterativas e podem envolver várias iterações e ajustes ao longo do processo. O objetivo é desenvolver um produto que atenda às necessidades dos clientes, seja viável tecnicamente e comercialmente e que gere valor para a empresa.

2.5.2. A fase de design no desenvolvimento de um produto

Tal como observado anteriormente, ter um bom processo de desenvolvimento de novos produtos é uma necessidade que pressupõe uma visão holística, ou seja, a construção de uma imagem única e integrada do processo de desenvolvimento de produto.

A metodologia de desenvolvimento do produto evoluiu ao longo do tempo e foi influenciada por várias áreas, como a engenharia, o design, a gestão de projetos e o marketing, sendo que, duas destas visões foram sendo mais destacadas, a visão da engenharia e do design. A primeira mais preocupada com aspetos funcionais e a segunda mais voltada para a estética e design.

A metodologia voltada para o design proposta por Bruno Munari [30] enfatiza a importância da observação e do processo experimental como etapas fundamentais para o desenvolvimento de ideias criativas e soluções inovadoras. Munari estabelece um fluxo de acontecimentos sequenciais entre as etapas, com a finalidade de somar conhecimento e de desenvolver um processo integral, desde a construção do problema até à sua solução [30].

De acordo com Munari esta metodologia inicia com a etapa denominada por “Problema”. Nesta etapa surge uma necessidade/problema e são definidos vários indicadores para a sua resolução.

De seguida o problema é dividido nos seus componentes, ou seja, todos os elementos que constituem o problema. Esta operação facilita no desenvolvimento do projeto, uma vez que tende a colocar em evidência todos os pequenos problemas que se ocultam nos subproblemas, segundo o autor.

Após determinar os componentes que constituem o problema, é necessário que o designer recolha os dados referentes a cada componente e os analise. A organização dos dados possibilita a análise aprofundada e potencializa o desenvolvimento de ligações entre os componentes.

Segundo Bruno Munari a solução do problema está na coordenação criativa que leva em consideração todos os dados recolhidos e analisados referentes aos componentes do problema. A etapa da “Criatividade” pode ser definida e delimitada como aquela onde se estabelecem ligações entre os dados recolhidos e analisados numa linguagem gráfica.

Logo depois, segue-se a etapa que consiste na recolha de dados relativa aos materiais e tecnologias que o designer tem à sua disposição para realizar o projeto, denominada por “Materiais e Tecnologias”. Posteriormente, tem-se a etapa em que são realizados testes ou experiências que potencializam a descoberta de novas aplicações de materiais, técnicas ou instrumentos.

Em seguida, são materializados os modelos que se pretendem produzir, ou seja, são gerados protótipos, para, através de uma análise dos mesmos, identificar possíveis modificações e ajustes. Nesta etapa são também verificadas questões relacionadas com custos e a viabilidade de produção.

Após esta verificação, são elaborados os desenhos com a especificação das dimensões necessárias à realização do protótipo final. A partir desta etapa, o produto pode agora ser materializado. Esta materialização é considerada a solução do problema definido na primeira etapa da metodologia [30].

Na Figura 6 está representada a metodologia de desenvolvimento de um produto, proposta pelo autor.



Figura 6. Metodologia proposta por Bruno Munari [27]

Um fator relevante da metodologia aplicada por Bruno Munari [30] é o reconhecimento das necessidades do projeto para, posteriormente, formular um problema. É, neste ponto, que a metodologia deste autor pode ser complementada por Gui Bonsiepe [31], que faz uma abordagem ao tema, propondo um modelo de design industrial. O que de mais relevante se retira do modelo de Bonsiepe, é a análise que complementa a recolha de dados sugerida por Munari, ao estabelecer que o designer necessita de uma pesquisa com maior foco acerca do objeto que irá criar. Desta forma, faz-se com que o problema seja bem projetado, com as suas variáveis bem definidas [31]. A metodologia desenvolvida por Gui Bonsiepe encontra-se representada na Figura 7.

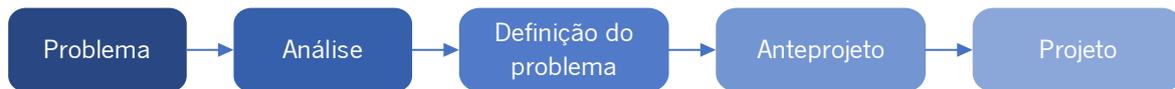


Figura 7. Metodologia desenvolvida por Gui Bonsiepe [28]

De um modo geral, Gui Bonsiepe enfatiza uma abordagem mais estruturada e científica para o design, considerando-o como parte de um sistema mais amplo e incorporando considerações éticas [31]. Por outro lado, Bruno Munari adota uma abordagem mais lúdica e experimental, valorizando a prototipagem e a simplicidade no design.

Ao longo do tempo, esta abordagem estética, funcional e ergonômica foi sendo também complementada pela inclusão de aspectos mais técnicos, de engenharia, os custos associados e a viabilidade de produção.

A metodologia desenvolvida por Karl T. Ulrich e Steven Eppinger [32] é mais abrangente e interdisciplinar, abordando tanto os aspectos estéticos, quanto os técnicos e funcionais do desenvolvimento de produto. Os autores enfatizam na sua metodologia a importância da integração contínua de todas as fases do desenvolvimento de produto, desde a concepção, design, prototipagem, produção, até à distribuição. Esta metodologia é principalmente focada na gestão e organização, fornecendo estruturas e ferramentas para gerir o fluxo de informações, definir responsabilidades, e acompanhar o progresso do projeto [32].

Para Karl T. Ulrich e Steven Eppinger [32] o desenvolvimento de produto inclui o uso de ferramentas e técnicas específicas, como o Desenvolvimento Integrado de Produto (DPI) e o *Design of Experiments (DOE)*, para melhorar a eficiência do processo de desenvolvimento e a qualidade do produto.

Esta metodologia, conhecida como "Processo de Desenvolvimento Integrado de Produto" envolve várias fases que guiam o desenvolvimento de um produto de forma estruturada e eficiente, como se demonstra na Figura 8.

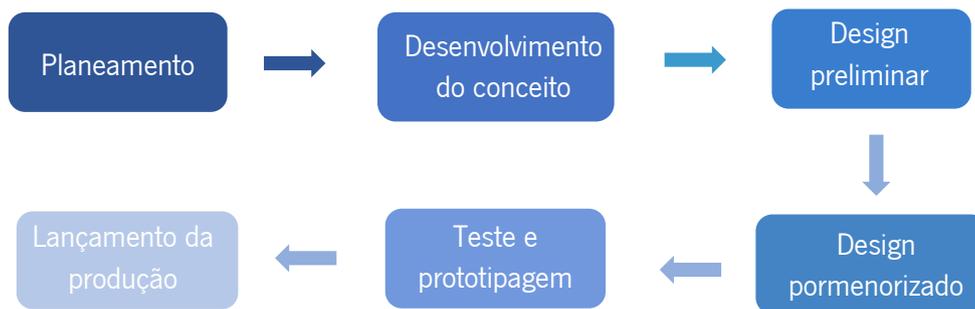


Figura 8. Metodologia desenvolvida por Karl T. Ulrich e Steven Eppinger [32]

Para os autores, as fases típicas deste processo incluem:

0. **Planeamento:** A fase de planeamento é frequentemente referida como "fase zero", uma vez que precede a aprovação do projeto e o lançamento do processo de desenvolvimento do produto. Esta fase começa com a identificação de oportunidades orientada pela estratégia empresarial e inclui a avaliação dos desenvolvimentos tecnológicos e dos objetivos do mercado;
1. **Desenvolvimento do conceito:** Na fase de desenvolvimento do conceito, são identificadas as necessidades alvo do negócio, são gerados e avaliados produtos alternativos e são selecionados um ou mais conceitos para desenvolvimento e testes posteriores. Um conceito é uma descrição da forma, função e características de um produto e é geralmente acompanhado por um conjunto de especificações, uma análise de produtos competitivos, e uma justificação económica para o desenvolvimento do projeto.
2. **Design preliminar:** Esta fase inclui a definição do design do produto, decomposição do produto em subsistemas e componentes, o desenho preliminar dos componentes mais importantes e a definição do sistema de produção e montagem. Geralmente os resultados desta fase incluem uma disposição geométrica do produto, uma especificação funcional de cada um dos subsistemas do produto e um diagrama preliminar do fluxo do processo de montagem;
3. **Design pormenorizado:** A fase de design pormenorizado inclui a especificação completa da geometria, materiais e dimensionamento do produto. Nesta fase é verificada a viabilidade de produção do produto com base em simulações, é descrita a geometria de cada peça e é dado início ao projeto de ferramentas de produção, equipamentos de produção e de teste;
4. **Teste e prototipagem:** A fase de teste e prototipagem envolve a construção e avaliação de várias versões pré-produção do produto. Estes são testados para validar o design e identificar possíveis problemas.

- 5. Lançamento da produção:** No início da fase de produção, ocorre o treino/formação da mão-de-obra, a resolução de problemas nos processos de produção, a preparação das unidades produtivas necessárias ao fabrico do produto e a otimização das mesmas [32].

Em resumo, a metodologia de Eppinger e Ulrich [32] traz uma abordagem mais estruturada e orientada para a gestão do processo de desenvolvimento de produto, o que pode ser especialmente útil em projetos complexos e industriais. Esta metodologia tem sido uma referência muito importante no campo do desenvolvimento de produto, sendo atualmente muito próxima da metodologia utilizada. Apesar da metodologia de Eppinger e Ulrich fornecer uma base sólida para o desenvolvimento de produto, é sempre importante acompanhar a evolução tecnológica dos dias de hoje e das tecnologias disponíveis, sendo necessárias adaptações e atualizações da metodologia.

Em contraste, Bruno Munari [30] e Gui Bonsiepe [31] têm abordagens mais amplas e menos estruturadas. Munari, por exemplo, faz uma abordagem mais artística e voltada para o design do produto, onde é dado mais ênfase às questões de forma e função. Bonsiepe, uma abordagem mais estruturada e científica para o design, considerando-o como parte de um sistema mais amplo.

Deste modo, vale a pena referir que, desde abordagens mais conceituais como Bruno Munari até abordagens mais técnicas como Eppinger e Ulrich [32], a fase conceptual e de detalhe geométrico encontra-se sempre presente na metodologia de desenvolvimento de um produto. Esta fase irá estabelecer a base para todas as etapas subsequentes do processo de desenvolvimento, sendo, portanto, determinante para todo o ciclo de vida do produto.

2.5.3. Importância da sustentabilidade no desenvolvimento de um produto

Um produto sustentável é projetado com a preocupação de reduzir o impacto ambiental, promover a responsabilidade social, garantir a eficiência de recursos, fortalecer a competitividade da empresa e cumprir as regulamentações ambientais [33]. Assim, o desenvolvimento de produtos sustentáveis deve ser considerado ainda na fase de planeamento do produto, de forma a ter em conta, por exemplo, a substituição de materiais perigosos e poluentes, a redução do consumo de água e energia, a geração de resíduos durante a produção, uso e distribuição do produto e aspetos nas fases de projeto, como desmontagem, reutilização e reciclagem [34].

No entanto, as atuais práticas de desenvolvimento de produtos em empresas são ainda predominantemente baseadas em modelos tradicionais de custo/lucro, visando alcançar a elevada qualidade de um produto, a baixo custo [35]. Desta forma, muitos dos requisitos ambientais acabam por

não ser considerados, principalmente por se tratarem de algo que gera restrições de design e que aumenta os custos. Nestes casos, a avaliação ambiental do produto é realizada bastante tarde no desenvolvimento do mesmo, não estando integrada às atividades de desenvolvimento existentes [36].

Na Figura 9, estão demonstradas as principais etapas do ciclo de vida de um produto desde o design, produção e uso até ao fim de vida. A abordagem tradicional não inclui quaisquer aspetos ambientais no processo de desenvolvimento [36]. Desta forma, na figura são demonstrados quatro exemplos de metodologias recentemente desenvolvidas nos estágios mais significativos do ciclo de vida de um produto, que influenciam o seu desempenho ambiental. Estas metodologias são:

- introduzir a consciência ambiental ao cliente;
- avaliar o desempenho ambiental;
- realizar a avaliação do ciclo de vida (LCA) durante o processo de design;
- avaliar o potencial de reutilização do produto e reciclagem.

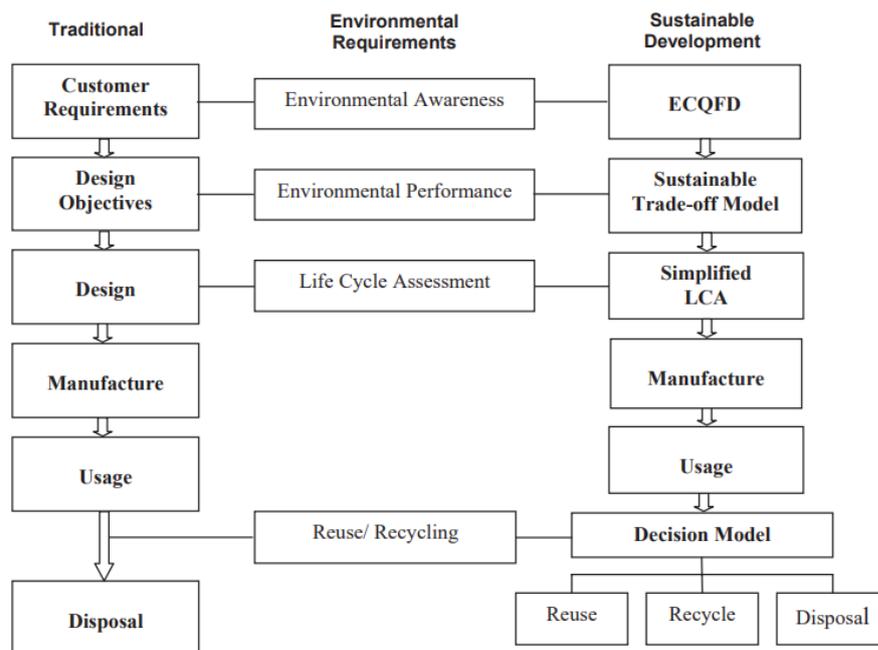


Figura 9. Metodologia para o desenvolvimento sustentável de um produto [36]

Como se pode observar a partir da Figura 9, as fases mais significativas em termos de melhoria da circularidade do produto e onde é efetuada a tentativa de implementação do desenvolvimento sustentável, são as fases mais precoces do desenvolvimento do mesmo, nomeadamente a fase de design do produto.

Deste modo, a inclusão de um membro especializado em sustentabilidade no departamento de desenvolvimento do produto é de extrema importância para garantir a integração efetiva dos princípios de sustentabilidade. Um membro dedicado à sustentabilidade do produto permite trazer conhecimentos especializados sobre práticas sustentáveis e regulamentações ambientais, podendo assim orientar a equipa de desenvolvimento na tomada de decisão, tendo em consideração os aspetos ambientais e sociais que irão determinar todo o ciclo de vida do produto. Isto significa considerar aspetos como a escolha de materiais sustentáveis, o design circular, a reciclabilidade e a minimização de resíduos desde o início da produção.

2.5.3.1. Design circular

Como referido anteriormente, a fase de design é uma etapa crucial para o desenvolvimento de um produto sustentável. Desta forma, conceitos como o design circular são aspetos de extrema importância quando o objetivo é criar produtos que minimizem o desperdício, promovendo um ciclo contínuo de uso, reutilização e reciclagem de materiais.

O design circular é um conceito que procura repensar e redesenhar o ciclo de vida dos produtos, com o objetivo de minimizar o seu impacto ambiental e promover a sustentabilidade. Este modelo procura afastar-se do tradicional modelo linear, em que os plásticos são frequentemente descartados como resíduos, resultando em poluição e desperdício no final da sua vida útil. Ao projetar um produto tendo em conta este critério, são considerados aspetos como o uso eficiente de materiais, a escolha de materiais recicláveis ou biodegradáveis, a facilidade de desmontagem e reparação, a modularidade para facilitar a atualização e a personalização, entre outros. O objetivo é sobretudo projetar produtos que possam ser utilizados durante um longo tempo, com a possibilidade de serem reparados, reciclados ou reintegrados de forma segura no final da sua vida útil [37].

Torna-se desta forma importante integrar as preocupações da economia circular em estágios iniciais do processo de design do produto, uma vez que as especificações do produto estão ainda a ser desenvolvidas, sendo, portanto mais facilitada essa integração [38].

De acordo com a Ellen MacArthur Foundation, existem várias abordagens e estratégias que podem ser adotadas para o design circular de um produto [39]:

- Promover a reutilização e recondicionamento dos produtos, evitando grandes alterações de funcionalidade e qualidade;
- Promover a modularidade dos produtos, tornando-os mais fáceis de reparar e substituir, facilitando assim a sua manutenção e prolongando a sua vida útil;

- Planear o design das peças tendo em conta a facilidade de desmontagem e a separação dos diferentes materiais. Isto facilita a reciclagem e a recuperação de materiais no final da vida útil da peça;
- Manter os produtos, componentes e materiais em uso pelo máximo tempo possível, de forma a prolongar a vida útil e evitar a substituição de produtos em ciclos de vida mais curtos;
- Diversificar o uso de produtos, componentes e materiais para finalidades adicionais quando estes já não puderem ser usados para a finalidade original;
- Considerar a escolha de materiais seguros e sustentáveis, como o uso de aditivos não tóxicos e optar por materiais recicláveis, renováveis ou de baixo impacto ambiental.

Para resolver este tipo de problemas, os dados relativos ao ciclo de vida devem ser integrados nas fases de conceção do produto. Para tal, os designers devem adotar como ponto de partida a sustentabilidade, de forma a conceber os seus produtos desde o início com uma mentalidade circular.

A capacidade de conceber um produto desde o início, tendo em conta os múltiplos ciclos de vida, cria uma vantagem económica significativa e pode impulsionar o avanço da tecnologia de produtos e processos. Vários autores defendem que este ponto efetivo deve ser anterior à fase de conceção ou o mais cedo possível e estimam que 70 a 80% dos custos do ciclo de vida de um produto são determinados pelas decisões tomadas em fases anteriores às fases de conceção [40].

A Figura 10 representa os custos das alterações na conceção e a capacidade de influenciar o impacto da *Triple Bottom Line* (3BL: Economia, Ambiente e Sociedade) ao longo da progressão da fase de design.

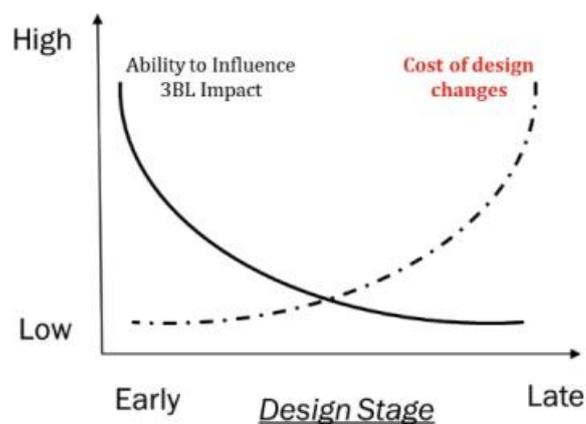


Figura 10. Custo das alterações na fase de design e a sua influência no 3BL [40]

As decisões tomadas nas etapas iniciais do ciclo de vida de um produto são críticas, uma vez que podem comprometer a sustentabilidade de todo o ciclo de vida. Assim sendo, o processo de design é uma das etapas do ciclo de vida de um produto mais importante. Por exemplo, a seleção de materiais pode influenciar de forma crítica o ciclo de vida total do material de um produto. Assim, é necessário considerar adequadamente o ciclo de vida total destes materiais, de maneira a utilizá-los de forma mais eficiente, rentável e sustentável [40].

Os automóveis são exemplos de produtos que, devido aos seus elevados custos iniciais, foram projetados para a durabilidade, manutenção e reparação. Além disso, nos dias de hoje a sua durabilidade permite um grande mercado de automóveis usados, peças e vendas de serviços, o que demonstra a importância da desaceleração do uso de recursos neste setor [38].

2.5.3.2. Indicadores de circularidade aplicados ao desenvolvimento de produto

A análise de circularidade do produto é uma abordagem que visa avaliar o desempenho ambiental de um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até ao seu fim de vida. No setor automóvel, esta abordagem é especialmente importante, uma vez que o fabrico de automóveis pode ter um impacto significativo no meio ambiente. Portanto, é importante considerar todas as etapas e tomar medidas para maximizar a eficiência dos recursos e minimizar os impactos ambientais em cada fase do ciclo de vida destes produtos. Torna-se, portanto, essencial criar uma abordagem comum para a medição e monitorização do desempenho da circularidade dos produtos [41].

Nesse sentido, o uso de indicadores de circularidade na fase de desenvolvimento de um produto poderá ser um *input* de grande importância para a conceção de um produto mais sustentável. Uma das razões para tal, trata-se do facto de os indicadores de circularidade ajudarem a avaliar e melhorar a sustentabilidade de um produto, não considerando apenas o seu ciclo de vida, como também o impacto ambiental e social, incentivando a adoção de práticas mais sustentáveis de produção e consumo [42]. Cada vez mais, a regulamentação, os clientes e até os consumidores, exigem produtos mais sustentáveis, e, neste sentido, o uso de indicadores de circularidade ajuda as empresas a atender a esses requisitos e fortalecer a sua posição no mercado, demonstrando um compromisso com a circularidade. Para além disso, a adoção de práticas circulares pode levar a uma redução nos custos de produção, uma vez que a reutilização de materiais e a minimização do desperdício poderão resultar em ganhos significativos [27]. Desta forma, ao medir e monitorizar a circularidade de um produto numa fase anterior à fase de

produção, a empresa poderá identificar oportunidades para reduzir o desperdício de recursos e minimizar a geração de resíduos.

Tal como abordado anteriormente, o desenvolvimento de um produto inicia com a fase de definição do conceito. Nesta fase, poderá ser identificado o produto e analisadas todas as etapas do ciclo de vida do mesmo, desde a extração de matérias-primas até ao seu fim de vida [43].

Posteriormente, na fase de design são especificadas as matérias-primas para o fabrico do produto, podendo estas ser avaliadas em termos de reciclabilidade, toxicidade, etc. Ainda nesta fase, poderão ser considerados conceitos de design circular, para maximizar a durabilidade, a facilidade de reparação e substituição de componentes e a reutilização do produto [43].

A recolha de todos estes dados poderá ser assim utilizada para o cálculo dos indicadores de circularidade, de forma a avaliar o desempenho do produto nesta temática, como a taxa de reciclagem, a quantidade de material reciclado e outros fatores relevantes. Com base nos resultados obtidos, poderão ser tomadas decisões que visem aumentar a circularidade do produto, como a seleção de materiais mais sustentáveis, o redesenho do produto ou a incorporação de matéria-prima reciclada.

Desta forma, podem ser implementados estes sistemas de monitorização para acompanhar o desempenho do produto ao longo do tempo, para assim efetuar melhorias constantes na sua circularidade.

Em resumo, o uso de indicadores de circularidade na fase de desenvolvimento do produto não contribui apenas para a sustentabilidade ambiental e social, mas também pode trazer benefícios económicos e estratégicos significativos para as empresas. À medida que a economia circular ganha cada vez mais destaque, é imperativo que as empresas se preparem para esta transição com base em informação sobre o seu desempenho circular, os riscos e as oportunidades associados. Neste sentido, as empresas necessitam de uma forma universal e consistente para medirem a sua circularidade. Portanto, o cálculo destes indicadores poderá ser uma prática importante para as organizações que desejam manter-se competitivas e responsáveis.

3. CARATERIZAÇÃO DA EMPRESA PARCEIRA

A Fehst Componentes Lda. (Figura 11) é uma empresa, localizada em Braga, fornecedora de componentes plásticos maioritariamente para o setor automóvel. Fundada em 1995, dedica-se à produção de sistemas e peças decorativas para o interior automóvel, contando com cerca de 20 anos de experiência no ramo e exportando grande parte da produção para outros países europeus. Esta empresa atua em diversas áreas, nomeadamente no desenvolvimento do produto, gestão de projetos, logística, produção e inovação, contando no seu histórico diversos projetos com várias OEM 's (*Original Equipment Manufacturer*), desde Mercedes, Seat, Audi, Volkswagen e Renault. O objetivo da empresa é desenvolver relacionamentos de longo prazo com os seus clientes, comprometendo-se a oferecer produtos de qualidade, e também o aconselhamento para soluções técnicas dentro da sua esfera de competências.

A empresa conta com uma área de produção que inclui máquinas de injeção, elétricas e hidráulicas, linhas de pintura automática ou com cura ultravioleta, linhas de montagem manuais ou automatizadas e ainda uma linha de eletro galvanização que permite a cromagem de peças plásticas [44].



Figura 11. Instalações da empresa Fehst Componentes [44]

3.1. Visão e objetivos

A Fehst Componentes apresenta como principal missão o seu reconhecimento no mercado relativamente às soluções completas para componentes plásticos que oferece, tanto para módulos mecânicos como estéticos.

Tem como principal foco a melhoria contínua, gestão de projetos e o planeamento da qualidade, de acordo com as normas e requisitos da indústria automóvel, distinguindo-se assim da concorrência pela qualidade, segurança e performance que exhibe. Para satisfazer as necessidades dos clientes, conta com mão-de-obra e profissionais altamente qualificados, que ao longo de três décadas continuam a contribuir com a sua experiência para o desenvolvimento dos produtos.

Desta forma, a ambição da empresa foca-se no desenvolvimento de relacionamentos de longo prazo com os clientes, comprometendo-se a oferecer não só produtos industriais, mas também um aconselhamento para soluções criativas dentro da sua esfera de competências [44].

A Fehst delineou como estratégia para um futuro próximo aumentar o valor acrescentado nos produtos em que participa, aprofundando a parceria com os clientes permitindo assim a integração na fase da conceção do produto.

3.2. Certificações da Empresa

Esta entidade dispõe de um sistema de gestão para a qualidade, ambiente, higiene e segurança no trabalho e segurança da informação. Este sistema é reconhecido pela AENOR e certificado pela IQNET, sendo certificado pela: ISO 9001, ISO 14001 e IATF 16949 [44].

As normas ISO 9001 e IATF 16949 são internacionalmente reconhecidas e certificam o sistema de gestão da qualidade. O objetivo principal da ISO 9001 é melhorar continuamente a satisfação do cliente, garantindo que os produtos ou serviços atendem consistentemente aos requisitos e padrões de qualidade [45]. A IATF 16949 é uma norma específica para a indústria automóvel e tem como objetivo principal promover a melhoria contínua, a prevenção de defeitos e a redução de variações e desperdícios em toda a cadeia automóvel. Desta forma, estabelece requisitos rigorosos para a gestão de processos, a garantia da qualidade do produto, a gestão de riscos, a competência dos colaboradores, a rastreabilidade e a conformidade regulamentar [46].

No que diz respeito à ISO 14001, trata-se de uma norma internacional do sistema de gestão ambiental que fornece diretrizes e requisitos para que as organizações estabeleçam e implementem um sistema de gestão ambiental eficaz. O principal objetivo desta norma é ajudar as organizações a

identificar, controlar e reduzir os impactos ambientais das suas atividades, produtos e serviços. A norma garante assim a gestão mais eficaz dos aspetos ambientais das atividades da empresa, assegura aos clientes o compromisso da organização com a gestão ambiental, garante o cumprimento legal e promove a consciencialização ambiental [47]. A responsabilidade ambiental torna assim a empresa mais sustentável, contribuindo para a redução do impacto proveniente do desenvolvimento e produção de peças plásticas por injeção, acabamentos superficiais, montagem e cromagem de peças plásticas.

3.3. Responsabilidade social e ambiental

A qualidade é um meio para atingir os grandes objetivos da Fehst: a satisfação total das expectativas dos clientes e a melhoria contínua dos seus produtos, sendo, portanto, uma empresa certificada pela norma da Qualidade (ISO 9001) e pela norma de Gestão da Qualidade Automóvel (IATF 16949). Uma vez que a responsabilidade ambiental é também um pilar muito importante na política da empresa, esta encontra-se certificada pela norma de Gestão Ambiental (ISO 14001). Esta norma garante a gestão mais eficaz dos aspetos ambientais das atividades da empresa, assegura aos clientes o compromisso da organização com a gestão ambiental, garante o cumprimento legal e promove a consciencialização ambiental [44]. Nesse sentido, a empresa tem também a preocupação em reduzir emissões de gases de efeito de estufa através do desenvolvimento de produtos que ajudem a reduzir o consumo de energia e da utilização de tecnologias inovadoras em processos de produção que mediante melhor aproveitamento de energia, reduzem emissões.

Como importante fabricante e empregador da sua região, a Fehst está empenhada em deixar um grande legado, contribuindo para melhorar a comunidade e desenvolver práticas ambientais sustentáveis, através da participação ativa em iniciativas ambientais, culturais e sociais locais. A Fehst é também membro do grupo de Embaixadores Empresariais de Braga, que promove ativamente a indústria local com o objetivo de atrair investimentos e estabelecer-se como um centro tecnológico.

O processo tem início com a receção da matéria-prima, que é armazenada numa estufa de forma a retirar a humidade e conferir a temperatura indicada para o processo de injeção. De seguida, é preparado o processo de injeção, onde é colocado o molde na máquina e inseridos os parâmetros de injeção requeridos para a peça a ser produzida. No caso de ser iniciada a injeção de um material diferente do anteriormente produzido, é dada a purga do material, sendo esta posteriormente embalada e sujeita a tratamento pela empresa recicladora.

Logo depois desta etapa, é dado início ao processo de injeção, onde a peça plástica é produzida, podendo esta ser, posteriormente, pintada ou cromada. Durante esta etapa é dado o corte do jito, em que este pode ou não ser reintroduzido novamente no processo de injeção. Para tal, existem granuladores acoplados à injetora, que permitem a granulação desses materiais, e que, subsequentemente, são incorporados novamente no processo, permitindo assim, o reaproveitamento de matérias-primas, com base na reciclagem primária dos materiais. Através da inspeção visual, também as peças classificadas como não conformes (NOK) são encaminhadas para tratamento, sendo trituradas e granuladas num moinho exterior à empresa, e, posteriormente, incorporadas no processo de injeção de produtos de menores especificações.

Caso as peças estejam conforme as especificações, estas sofrem embalagem primário, que consiste em embalar peças que sofreram apenas um processo de transformação.

Posteriormente, estes produtos ficam armazenados no seu respetivo supermercado, sendo encaminhados para o processo de montagem, pintura ou cromagem. Relativamente ao processo de pintura, este consiste no revestimento das peças em plástico, tratando-se, portanto, de um processo de acabamento superficial [49]. Neste processo é projetada tinta na direção do substrato, de forma automática ou manual, de modo a que este seja totalmente coberto. Existem dois tipos de tintas em utilização na empresa, nomeadamente, tinta com base de solvente ou com base de água. No caso da empresa Fehst, esta projeção pode ser executada de forma automática, através de cura convencional ou através de cura ultravioleta.

Na cura convencional, são utilizadas estufas que possibilitam a secagem rápida da tinta. Neste caso, a pintura é feita na máquina *VenjaKob* que possui quatro pistolas para pintura com utilização de tinta à base de solvente e quatro pistolas para pintura com utilização de tinta à base de água.

Já a linha de pintura com cura UV, tal como o nome indica, utiliza uma gama de luz ultravioleta (UV) de alta intensidade, para curar ou “secar” as tintas instantaneamente. Esta técnica tem vindo a ser aplicada cada vez mais, devido às excelentes propriedades que proporciona ao revestimento como, maior resistência ao risco, redução da acumulação da humidade e a possibilidade de revestimento de peças

mais complexas. Esta técnica confere alto brilho às peças, recorrendo a um menor consumo de energia e materiais poluentes, permitindo assim a redução nos tempos de processamento graças à rapidez do processo de secagem da tinta após a pintura.

Os produtos resultantes do processo de pintura poderão ser embalados (embalagem secundária), armazenados e expedidos ou serem alvo do processo de montagem e só depois expedidos.

Por outro lado, a cromagem é um processo de acabamento superficial que consiste no revestimento de peças plásticas com metal. Este processo é realizado com o intuito de conferir propriedades de resistência químicas, melhorar a aparência estética das peças e fornecer proteção contra corrosão e desgaste. No entanto, trata-se de um processo que envolve químicos ambientalmente tóxicos, como o crómio hexavalente, pelo que é fundamental seguir os regulamentos e diretrizes ambientais relacionados com este processo [50].

Na empresa, o processo de cromagem é realizado apenas em peças de ABS, o que torna o processo bastante complexo. Este envolve etapas como a preparação prévia da superfície, a aplicação do revestimento e a cromagem propriamente dita. Por se tratar de um polímero não condutor, é necessário que o ABS passe por um pré-tratamento, para que assim seja criada uma camada condutora e o metal possa ser depositado na peça e aumentar a adesão peça-metal.

Os produtos resultantes da etapa de cromagem são embalados (embalagem secundária), armazenados e expedidos.

O fluxograma com a descrição pormenorizada de cada uma das etapas presentes pode ser consultado no Anexo 1. As regiões apresentadas a amarelo representam etapas opcionais possíveis, ou seja, processos secundários de acabamento e a azul são descritas etapas que somente se verificam para subconjuntos.

É ainda importante referir que a Fehst Componentes é classificada na cadeia de abastecimento como um fornecedor do tipo *tier II*, ou seja, fornece produtos e materiais a uma empresa *tier I* que posteriormente alimenta a *OEM (Original Equipment Manufacturer)*.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1. Caso de estudo 1

Como primeiro caso de estudo, foi selecionada uma peça atualmente produzida na Fehst, de modo a poder estabelecer comparação com o caso de estudo 2, em fase de desenvolvimento.

A peça selecionada é intitulada de *Dekorblende BFS RL*. Esta peça faz parte de um projeto com a *Volkswagen* e constitui o tablier de um automóvel, onde posteriormente serão introduzidos o computador de bordo e o *airvent* (Anexo 2), como se observa na Figura 13.



Figura 13. *Dekorblende BFS RL*

A peça é produzida em duas versões, uma para veículos de condução à esquerda, vulgarmente designados, LHD (*Left hand drive*), e outra para veículos de condução à direita, RHD (*Right hand drive*). Neste caso, o estudo será baseado nas peças de condução à esquerda visto que são as produzidas em maior quantidade, sendo, portanto, mais facilmente disponíveis para análise e observação dos respetivos processos. As peças LHD e RHD são semelhantes, sendo a maioria das suas estruturas simétricas.

O produto em questão é produzido em PC/ABS, permitindo baixa contração e elevada precisão dimensional. É ainda composto por cerca de 2% de TPS, uma borracha termoplástica, injetada em determinados pontos ao redor da peça, permitindo a ausência de ruído e a estabilização da peça durante o funcionamento do automóvel (Figura 14).



Figura 14. Borracha TPS

O facto de esta peça possuir na sua composição dois tipos de materiais, faz com que sejam gerados dois jitos de materiais diferentes no processo de injeção. O jito resultante de PC/ABS é automaticamente separado e encaminhado para um moinho que realiza a granulação do material, sendo este imediatamente reintroduzido no processo (Figura 15 (a)). O jito proveniente de TPS é recolhido pela entidade recicladora, uma vez que, a sua granulação para a imediata incorporação no processo de injeção, resulta na formação de pós que contaminam a peça injetada.

Logo após o corte do jito automático, a peça é dirigida para um equipamento de aquecimento por radiação infravermelha (IR), encarregue pela rebarbagem térmica da peça, como se demonstra na Figura 15 (b). Este dispositivo é utilizado para solucionar o defeito de rebarba após a injeção da peça, em que esta fica sujeita à radiação infravermelha, ocorrendo o aquecimento e a posterior fusão da rebarba [51].

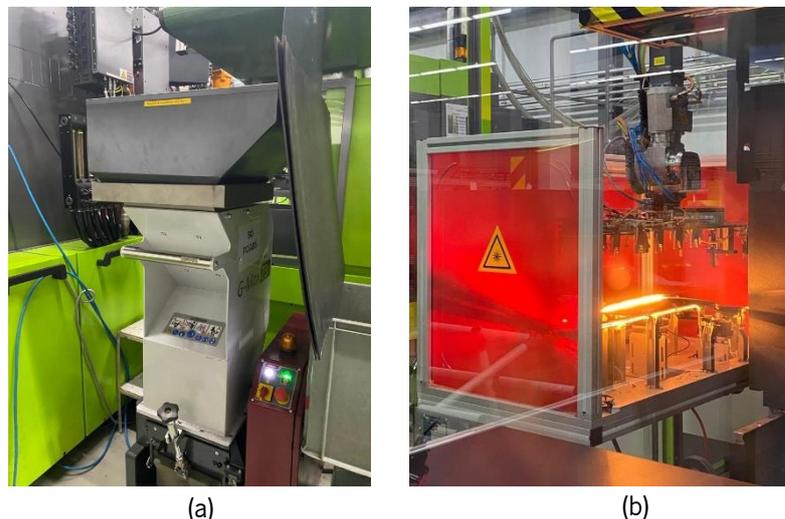


Figura 15. (a) Granulador de PC/ABS; (b) Rebarbagem térmica

Posteriormente, esta peça sofre o processo de pintura e pode utilizar cerca de oito tintas de cores diferentes, como se demonstra na Figura 16. Dependendo do tipo de tinta utilizada, o nível de refugo de cada peça pintada irá variar, uma vez que diferentes tintas proporcionam a acentuação ou não, de defeitos originados na injeção ou de impurezas presentes na peça. Desta forma, estas peças não conformes provenientes da etapa de pintura, são encaminhadas para uma empresa recicladora, como se demonstra no fluxograma apresentado no Anexo 3.



Figura 16. Diferentes tintas utilizadas

No entanto, para efeitos de cálculo, optou-se por seleccionar somente uma destas tintas para análise, a SCHWARZ HG. Esta tinta possui base de solvente e é a que apresenta maiores níveis de refugo, uma vez que faz transparecer os defeitos de forma mais acentuada.

Seguido do processo de pintura, a peça sofre a montagem de 8 molas metálicas, necessárias para a posterior fixação do computador de bordo (Anexo 2). Na Figura 17 está representada a etapa de montagem das molas.



Figura 17. Montagem das molas no produto

De salientar que, o produto não conforme cujas molas metálicas ainda não foram montadas, é separado e enviado para reciclagem para a empresa recicladora. Já para o produto montado não conforme, a empresa recicladora não possui os meios necessários para a desmontagem das molas metálicas, pelo que é enviado para um operador de gestão de resíduos diferente, que efetua outro tipo de tratamento a este produto (Anexo 1).

Na Tabela 1 encontram-se sintetizados alguns dados importantes do produto, assim como valores necessários para proceder aos cálculos da circularidade.

Tabela 1. Dados importantes acerca do produto

Dados	Injeção	Pintura	Montagem
<i>Matéria-prima</i>	PC/ABS (296 g) TPS (6.4 g)	Tinta Schwarz HG (2.6 g)	Aço (2,7 g)
<i>% Material reciclado</i>	6%	-	-
<i>Massa (g)</i>	302.4	305	307.7
<i>Tempo de ciclo (s)</i>	82.97	6	13.86
<i>Total Produção (peças/ano)</i>	235 477	51 371	51 106
<i>Produtos vendidos (ano)</i>	51 106		

4.2. Caso de estudo 2

O segundo caso de estudo consiste na modificação de um produto ainda em desenvolvimento, de modo a que este se torne mais circular. Desta forma, pelo facto da peça se encontrar ainda em fase de desenvolvimento, muitas das informações relativas ao seu design e produção não estarão ainda especificadas, tendo em conta todas as alterações que estes processos poderão vir a sofrer. Estas modificações surgem tanto pela necessidade de cumprir requisitos estéticos exigidos pelo cliente, como pela tentativa por parte da empresa de encontrar soluções funcionais de modo a cumprir esses requisitos.

Neste segmento serão apresentadas as diversas modificações que o produto foi sofrendo ao longo do seu desenvolvimento, iniciando pela seleção das matérias-primas, passando pela sua solução construtiva até ao tipo de processos pelos quais o produto será sujeito. Esta abordagem permitirá retirar conclusões acerca do estado atual do produto em termos da sua circularidade, que poderão ser assim um *input* para a sugestão de outras metodologias de conceção do mesmo. Para tal, recorrer-se-á ao

cálculo dos indicadores de circularidade mais pertinentes para este caso de estudo, que permitam estimar em que patamar de circularidade se encontra o produto nesta fase.

4.2.1. Desenvolvimento do produto

O produto em desenvolvimento na empresa consiste numa consola central de um automóvel, semelhante à representada na Figura 18. Este produto terá de ser capaz de cumprir funções como o suporte de objetos/utensílios, possuir entradas USB e também uma zona de carregamento de dispositivos sem fios.



Figura 18. Consola central de um automóvel

Inicialmente foram desenvolvidos e analisados diversos protótipos do produto pela equipa de desenvolvimento de projeto da Fehst. Estes protótipos resultaram de diversas tentativas em conjugar a estética do produto com a sua funcionalidade. Ou seja, por um lado proporcionar ao produto a aparência exterior requerida pela equipa de design externa à empresa, como também aliar a parte técnica a cargo da equipa de desenvolvimento da Fehst.

Desta forma, o primeiro protótipo desenvolvido consistiu num conjunto de 4 componentes injetados e posteriormente soldados, sendo a sua montagem como a descrita na vista explodida da Figura 19.

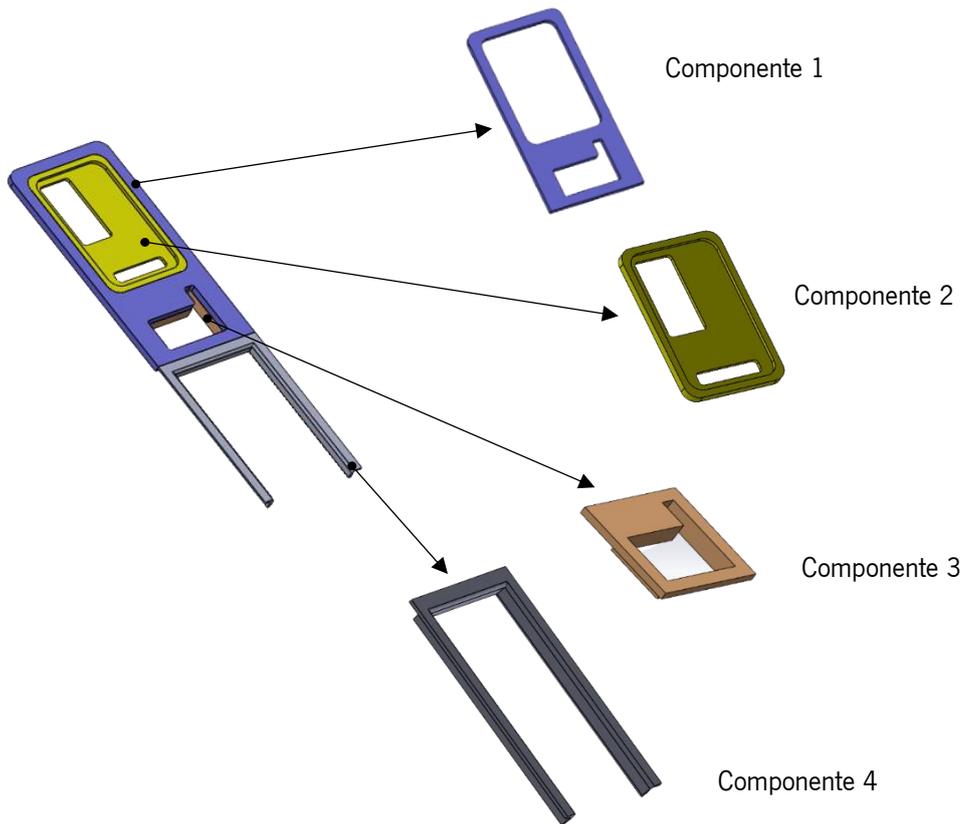


Figura 19. Protótipo inicial do produto

Neste caso, pelo facto de o componente 4 (Figura 19) não possuir a devida resistência mecânica e estar sujeito a quebra aquando a sua utilização, foram necessárias modificações relativamente ao design de alguns dos componentes.

Assim, primeiramente, foi adicionado ao componente 1 uma estrutura semelhante ao componente 4, como se demonstra na Figura 20. Já o componente 3 passou a estar situado na parte posterior da peça, sendo este agora soldado ao componente 4, permitindo conferir maior suporte e propriedades mecânicas à peça, numa zona mais frágil da mesma.

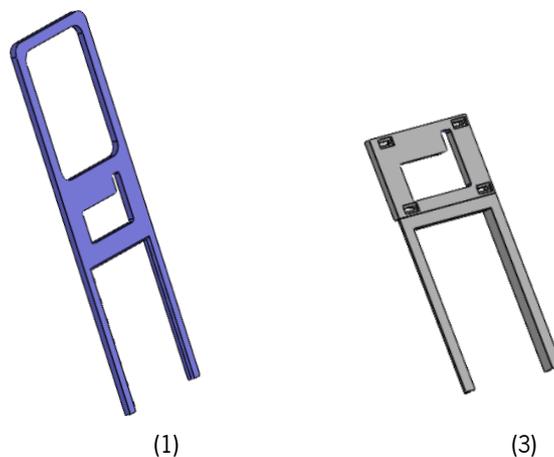


Figura 20. Alterações executadas nos componentes 1 e 3

Desta forma, para além de aumentar a resistência do componente 1, também a proposta do cliente acerca da não existência de *gaps* (espaços entre componentes), devido à sua união, foi cumprida, pelo facto de este ser agora produzido integralmente. Esta opção surge de uma tendência por parte do cliente em ter ambientes mais *clean*, ou seja, em produzir peças o quanto maiores possíveis com o objetivo de eliminar ou minimizar as uniões entre as mesmas.

Relativamente ao componente 3 (Figura 20), por se tratar de uma peça de suporte e necessitar de melhores propriedades mecânicas, foi proposto o reforço com fibra de vidro, pelo facto da mesma adicionar rigidez e estrutura à peça plástica, tornando-a mais resistente à flexão e à quebra. Estes dois componentes (1 e 3) serão também soldados.

Após várias alterações, seja por questões técnicas como por questões estéticas, foi proposto o protótipo final, tal como se demonstra na vista explodida do produto, presente na Figura 21. De notar que todos os componentes do conjunto foram alvo de alterações no seu desenho técnico, de modo a preservar a confidencialidade que o projeto exige.

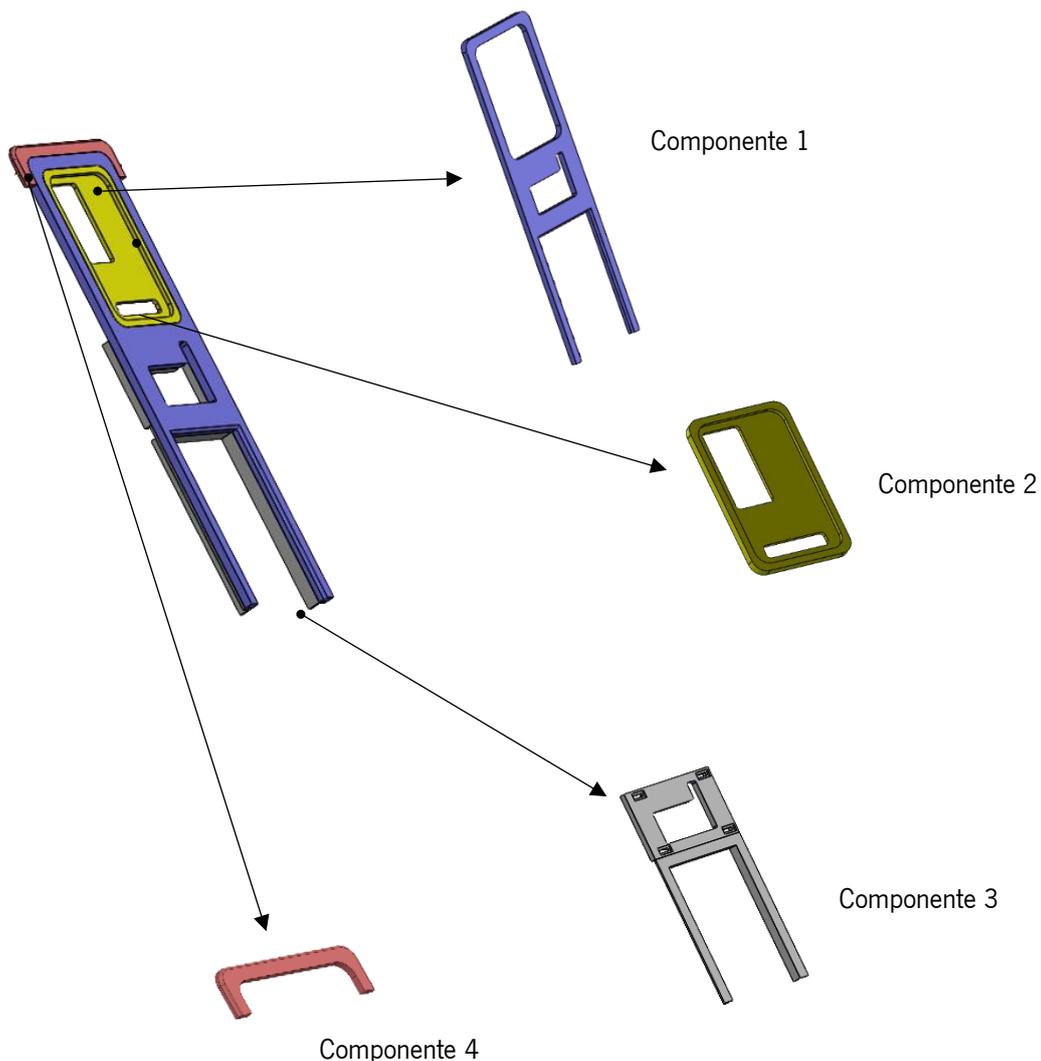


Figura 21. Protótipo final do produto

O produto denomina-se por *ZSB Abdeckung AUT* e constitui um conjunto montado, posteriormente incorporado na zona central do automóvel. Cada um dos seus componentes exerce as seguintes funções:

- **Componente 1:** este componente é constituído por uma abertura para a inserção de uma estrutura elétrica;
- **Componente 2:** consiste numa estrutura para carregamento de dispositivos sem fios e USB, sendo revestida por um tapete de borracha de modo a permitir o suporte de telemóveis;
- **Componente 3:** trata-se de um elemento estrutural que será fixo ao componente 1, de forma a conferir maior resistência, estrutura e reforço ao mesmo;
- **Componente 4:** constitui um aro estético acoplado ao componente 1.

4.2.1.1. Seleção de matérias-primas

A seleção de matérias-primas é fundamental para a circularidade de um produto plástico, uma vez que esta afeta diretamente a sua capacidade de ser reciclado ou reutilizado de forma eficiente e sustentável. Neste caso em concreto, um dos pontos de maior importância para a circularidade do produto em questão, centra-se na uniformização das suas matérias-primas, uma vez que tais alterações poderão conferir maior reciclabilidade ao produto. Esta uniformização permite que o material seja classificado e separado com maior eficiência, aumentando a pureza dos materiais reciclados e reduzindo o risco de contaminação durante o processo de reciclagem.

No entanto, os clientes com os quais a empresa se relaciona, possuem já no seu histórico os tipos de materiais que funcionam em determinados testes e que se apropriam a determinadas aplicações. Portanto, as matérias-primas requeridas pelo cliente acabam por estar definidas para determinados produtos, não sendo usual a sua alteração por parte da empresa durante o seu projeto de desenvolvimento, a menos que seja necessário algum tipo de característica funcional ou, por exemplo, a pintura do componente.

Desta forma, uma das principais razões para a seleção de PC/ ABS para o componente 1 e 4, advém da sua necessidade de pintura, uma vez que na empresa apenas componentes fabricados a partir desta matéria-prima podem ser pintados.

Outra das razões surge do facto de uma determinada peça necessitar de cumprir especificações em termos de resistência, como é o caso do componente 3, que será reforçado com fibra de vidro pela necessidade de garantir resistência mecânica para acoplar e suportar o componente 1. Já o componente

2 não irá necessitar da etapa de pintura, uma vez que, posteriormente, será revestido por um tapete de borracha. Por este motivo e também pelo facto de a mistura PC/ABS ser mais dispendiosa, este componente será fabricado apenas em ABS.

Na Tabela 2 estão representadas as matérias-primas de cada um dos componentes, bem como a percentagem de material reciclado que cada um irá incorporar.

Tabela 2. Seleção de matérias-primas de cada componente

Descrição	Matéria-prima	% Material reciclado	Massa (g)
<i>Componente 1</i>	PC/ABS	20%	205
<i>Componente 2</i>	ABS	20%	168
<i>Componente 3</i>	PC/ABS +10% fibra de vidro	20%	102
<i>Componente 4</i>	PC/ABS	20%	46.3

Como se pode constatar através da Tabela 2, a escolha de matérias-primas é bastante homogénea, no entanto, o facto de o componente 3 ser reforçado com fibra de vidro pode revelar-se num ponto negativo no que toca ao fim de vida do produto. Numa primeira instância, a fibra de vidro pode limitar os equipamentos de reciclagem, uma vez que por se tratar de um material abrasivo e mecanicamente mais resistente, exige a utilização de granuladores mais complexos. No entanto, o problema reside principalmente na reincorporação do material, uma vez que a fibra de vidro se trata de uma carga particular, que altera bastante as propriedades do material. Isto deve-se ao facto de as fibras de vidro serem fibras longas, que, durante o processo de reciclagem são partidas inúmeras vezes, não proporcionando as propriedades mecânicas necessárias ao componente no qual será incluído futuramente.

Relativamente à incorporação de material reciclado no produto, segundo a norma da *Volkswagen*, é exigido um mínimo de 20% de material reciclado na constituição da matéria-prima para o fabrico dos componentes deste produto. Contudo, este material reciclado não poderá ser proveniente da granulação dos sistemas de alimentação nos moinhos da Fehst, e imediatamente incorporado no processo, uma vez que o mesmo não é considerado “material reciclado” segundo a DIN EN ISO 14021, secção 7.8.1.1.a). Esta norma esclarece o que se constitui por material reciclado aceitável para fins de incorporação de conteúdo reciclado, definindo que o mesmo terá de ser proveniente de um processo em que este foi realmente descartado, recolhido e reprocessado. Ou seja, estes resíduos terão de sair das instalações

da fábrica que o gerou, seguindo, posteriormente, o caminho da reciclagem, sendo considerados material pós-consumo [52].

Neste caso, o material utilizado para incorporação de cada um dos componentes do conjunto *ZSB Abdeckung AUT* será fornecido pela *Ravago Polymers*, uma empresa refinadora de polímeros que utiliza matéria-prima proveniente de subprodutos derivados do petróleo, ou seja, de uma junção de material reciclado de vários tipos de indústrias ou processos, em que se obtém matéria-prima com menores especificações. Esta técnica pode ser considerada mais circular em comparação com outros processos de produção de polímeros, como a produção a partir de fontes fósseis. Isto porque, a refinação de polímeros envolve o uso de polímeros já existentes, como plásticos pós-consumo ou resíduos de produção, que são processados para obter novos polímeros ou produtos plásticos.

4.2.1.2. Estudo de tolerâncias

Também aliado à sustentabilidade, foi estudada a possibilidade de os componentes 2 e 3 (Figura 21) serem fabricados a partir da mesma matéria-prima, ou seja, serem fabricados integralmente, de maneira a evitar a soldadura dos mesmos. Para tal, foi elaborado um estudo de tolerâncias que permite definir os limites dentro dos quais as dimensões de uma peça podem variar para garantir que o produto final atende aos requisitos do projeto e funciona corretamente [53]. O objetivo final deste estudo é encontrar um equilíbrio entre a precisão desejada do produto e a capacidade de fabrico, garantindo que o produto atende às expectativas de qualidade e funcionalidade.

Para tal, torna-se necessário recorrer à norma de Sistemática de Pontos de Referência (RPS) fornecida pelo cliente, de forma a estudar como o componente deve ser posicionado geometricamente através de um sistema de pontos de referência no sistema de coordenadas do veículo [54].

Um corpo apresenta, no espaço tridimensional, seis graus de liberdade (três de translação e três de rotação), sendo necessário durante a fase de projeto especificar pontos de fixação, guias e *stoppers*, com o intuito de alcançar a estabilidade da peça [54]. De acordo com a tabela de tolerâncias, apresentada no Anexo 4, verifica-se que as tolerâncias de uma peça tendem a aumentar tendo em conta a distância do elemento guia ao *gap* em análise. Deste modo, tipicamente os guias encontram-se posicionados em zonas mais críticas, ou seja, zonas que serão mais visíveis pelo utilizador, de forma a garantir que nessas zonas não exista variação de dimensões. A Figura 22.a) representa a possibilidade de separação dos componentes 2 e 3 e a Figura 22.b) a junção dos mesmos. De notar que as imagens se apresentam desfocadas para preservar a confidencialidade exigida pelo projeto em curso.

Em relação à possibilidade de fabricar os dois componentes separadamente (Figura 22. a), verifica-se que o guia se encontra relativamente próximo do *gap* onde será inserido o componente elétrico, proporcionando uma tolerância de cerca de $\pm 0,08\text{mm}$.

Com o desenvolvimento da opção B, ou seja, da junção dos componentes, e recorrendo ao *input* do cliente sobre a localização do guia, a distância do mesmo ao *gap* aumentou, provocando uma tolerância dimensional de aproximadamente $\pm 0,23\text{mm}$, superior ao valor da opção A ($\pm 0,08\text{mm}$). Deste modo, os valores de tolerâncias da opção B, indicam que o *gap* em questão irá variar dimensionalmente $\pm 0,23\text{mm}$, no entanto, o valor obtido para a opção A revela ser mais satisfatório para efeitos estéticos. A reduzida variação de tolerâncias da opção A deve-se à divisão da peça em duas componentes, promovendo que o *gap* esteja apenas dependente do componente 3. Neste caso, devido à dependência de apenas uma peça, o estudo de tolerâncias é dado tendo em conta o ponto guia da mesma, estando este mais próximo do *gap*, proporcionando menores valores de tolerância.

Para além do estudo estatístico de tolerâncias indicar que a opção A é a mais vantajosa, um outro fator que enfatiza esta seleção está relacionado com a capacidade de suporte de esforços mecânicos sobre a consola central, sendo, desta forma, o componente 3 reforçado com fibra de vidro. No entanto, o facto dos componentes serem fabricados a partir de matérias-primas diferentes, de um ponto de vista de sustentabilidade, não é de todo vantajoso. As alternativas mencionadas anteriormente serão exploradas no Capítulo 5, a fim de verificar, em termos de circularidade, o impacto da soldadura de duas matérias-primas diferentes.

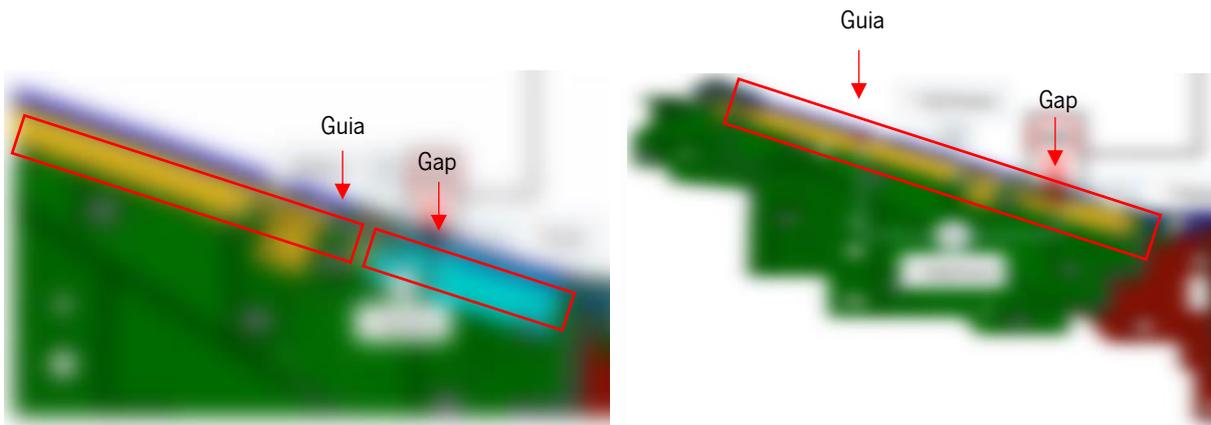


Figura 22. Apresentação de imagens da peça considerando: a) a separação dos dois componentes, guia e gap; b) a junção dos dois componentes, guia e gap.

4.2.1.3. Montagem dos componentes

Para a união dos componentes do *ZSB Abdeckung AUT* recorrer-se-á à soldadura por ultrassons, em que todos os componentes serão unidos em formato *sandwich*, como se demonstra na Figura 23.

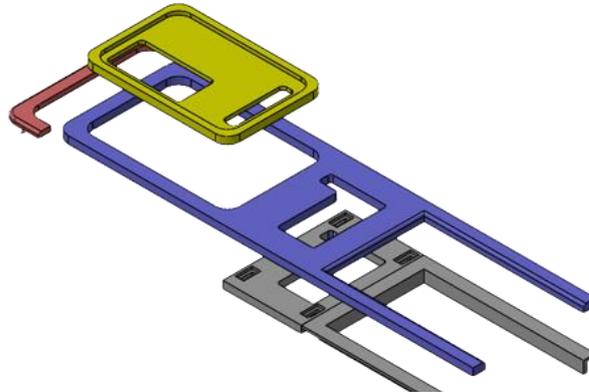


Figura 23. Montagem dos componentes

A soldadura por ultrassons é um método de junção de peças plásticas através da conversão de energia elétrica em vibrações mecânicas de alta frequência. Nesta tecnologia, a peça é fixa numa base, de forma a que esteja alinhada corretamente para garantir uma soldadura uniforme. De seguida, o sonotrodo (Figura 24) entra em contacto com os *ribs* de soldadura, induzindo vibração na área de união. Estas vibrações geram calor por atrito e o material da região funde e flui na região da junta, formando-se uma interface estável que promove a união da peça.

A Figura 24 representa um equipamento de soldadura por ultrassons.

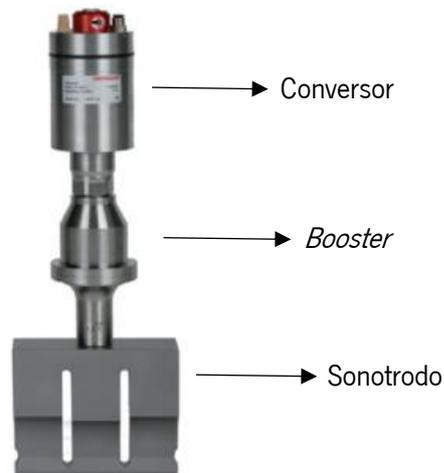


Figura 24. Equipamento de soldadura por ultrassons

A soldadura de componentes plásticos é uma ótima solução do ponto de vista produtivo, uma vez que se trata de um processo rápido, permitindo que as peças sejam unidas numa questão de

segundos. Esta técnica permite também uma união entre componentes forte e duradoura, uma vez que o material das duas peças é fundido em conjunto. No entanto, este processo cria também uma problemática quando utilizada indevidamente, mais propriamente, para unir componentes fabricados a partir de matérias-primas diferentes, como é o caso do componente 3 (PC/ABS com fibra de vidro) que será soldado ao componente 1 constituído por PC/ABS. Tal como referido anteriormente, o facto de uma das matérias-primas ser reforçada com fibra de vidro poderá inviabilizar a reciclagem do produto.

Uma outra razão para o componente 3 ser soldado ao componente 1, trata-se do facto de ser necessário garantir o posicionamento relativo entre as duas peças, de forma a introduzir um componente eletrónico entre as mesmas. Desta forma, as peças não poderão deslocar-se, caso contrário o rasgo não irá coincidir e não poderá ser introduzido o componente eletrónico.

Este problema poderia ser evitado caso, por exemplo, o componente 1 fosse alvo de modificações, como por exemplo, a adição de *ribs* ou o aumento da sua espessura. Neste caso, não seria necessária a adição do componente 3, e, desta forma, o produto seria inteiramente reciclável, pelo facto de não possuir fibra de vidro na sua composição. No entanto, com a adição de *ribs* o nível de estabilidade da peça poderia continuar a ser baixo, uma vez que a estrutura superior da peça seria muito rígida enquanto a parte inferior, por se tratar de uma estrutura com menor área, estaria sem qualquer suporte e assim sujeita a quebra aquando a sua utilização. Além disso, a adição de estruturas de reforço ou de fixação numa peça poderiam provocar defeitos estéticos na mesma, não sendo isso aconselhável pelo facto de este componente ser estético.

Desta forma, para contrariar este tipo de defeitos e adicionalmente conferir maior suporte à peça estética 1, todas as estruturas que seriam adicionadas ao componente estético foram transferidas para o componente técnico 3, exceto as *ribs* de soldadura, que permitem ao componente ser soldado.

4.2.1.4. Testes de colisão

Após a fase de design do produto, os protótipos são submetidos a testes e verificações para garantir que estes atendem aos requisitos e padrões estabelecidos. De entre estes testes, estão incluídos testes de segurança como o *Rear Crash Test* (Figura 25).

O *Rear Crash Test* é um tipo de teste de segurança realizado para avaliar o desempenho e a segurança do veículo em caso de colisão na parte traseira, tendo como objetivo avaliar a capacidade de um veículo proteger e minimizar o risco de lesões dos passageiros. Estes testes são realizados em ambientes controlados, procurando simular, da forma mais aproximada possível, situações reais. São utilizados sensores em pontos específicos do carro e colocados manequins (adultos e crianças) no seu interior, de forma a analisar o comportamento dos ocupantes, bem como das estruturas e sistemas de segurança do automóvel durante e após a colisão. Os resultados dos testes de colisão permitem assim aos fabricantes projetar e aprimorar as estruturas dos veículos, bem como os sistemas segurança para a proteção dos ocupantes [55].



Figura 25. Simulação do *Rear Crash Test* [55]

Relativamente ao produto em estudo, os resultados da simulação em caso de colisão permitiram concluir que os mecanismos de encaixe existentes nos componentes não são suficientes para garantir a fixação da peça ao automóvel, sendo a peça projetada aquando a colisão. Com base nessa informação, e aliado à sustentabilidade de maneira a evitar a soldadura da peça ao automóvel, foi estudada uma alternativa que passa pela alteração da geometria do componente 4. Esta modificação é bastante vantajosa não só em termos de sustentabilidade, como também pelo facto de não implicar custos adicionais na ferramenta (molde).

A alteração consiste em adicionar dois ganchos ao componente 4, que permitem a sua fixação a um outro componente na lateral que possui pinos de suporte, de forma a reforçar a sua fixação ao automóvel. Na Figura 26 está representada a alteração da geometria do componente 4.

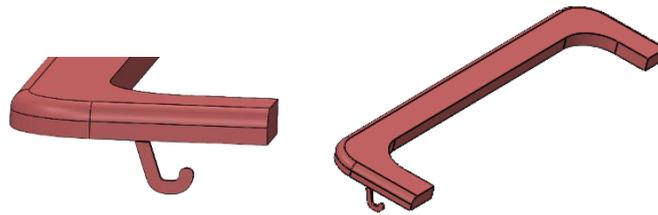


Figura 26. Alteração da geometria do componente 4

Contudo, esta solução poderá não ser viável uma vez que os resultados das simulações indicam que a peça à qual o componente estará fixo é projetada durante a colisão. Isto indica que, caso a peça seja projetada, também o componente (4) será igualmente projetado pelo facto de estar fixo à mesma. Desta forma, a sua fixação poderá não ser resistente o suficiente para resistir a uma colisão, pelo que poderá ter de ser recorrida à soldadura dos componentes.

4.3. Seleção dos micro indicadores de circularidade para aplicação nos casos de estudo

De entre os vários indicadores existentes, os que se consideram mais relevantes a aplicar à indústria automóvel, são indicadores que relacionam a incorporação de material reciclado num produto, a eficiência de recursos e a gestão de fim de vida. Assim, uma vez que os produtos desenvolvidos na empresa Fehst se enquadram maioritariamente no ramo automóvel, este será o setor alvo de estudo. Alguns dos indicadores, apesar de aplicáveis, exigem cálculos complexos, por outro lado, existem indicadores que são impraticáveis, ou seja, avaliam etapas desenquadradas ou não são exequíveis para determinada indústria. Assim, considerando o tipo de material, processamento, o número de componentes e tipologia do produto selecionado, muitos indicadores tornam-se pouco relevantes para o caso de estudo, sendo necessário efetuar uma seleção cuidada dos indicadores de maior interesse. Desta forma, existe a necessidade de adequar a medição de circularidade para o setor mais oportuno considerando a tipologia do produto de análise.

Assim, através de um estudo prévio acerca dos micro indicadores de circularidade presentes na literatura, em conjunto com a sua capacidade de avaliar a circularidade em relação aos produtos selecionados, foi selecionado um conjunto de indicadores mais pertinentes para os casos de estudo [26]. Desta forma, destacam-se indicadores como a Pontuação de Reutilização do Material (MRS), o Índice de Desejabilidade da Reciclagem (RDI), o Indicador de Circularidade do Material (MCI), e o Indicador de

Eficiência de Recursos baseado no Valor (VRE), o Protótipo de Indicadores de Economia Circular (CEIP) e as Diretrizes de Design Circular (CDG).

Relativamente aos indicadores MRS, RDI, MCI e VRE, assentam numa análise quantitativa, sendo, portanto, necessários cálculos para a obtenção de um valor para a circularidade do produto em estudo, permitindo monitorizar em que patamar este se encontra na direção de uma economia circular. Já os indicadores CEIP e CDG, baseiam-se numa análise qualitativa, sendo necessário dar resposta a um conjunto de perguntas ou a identificação de diretrizes para a obtenção de uma classificação para o produto. Para a realização dos respetivos cálculos, é necessário efetuar a recolha dos dados necessários para a medição da circularidade. Nesses dados devem ser incluídos os *inputs* do produto, como por exemplo a matéria-prima utilizada e qual a sua composição e as tecnologias de processamento e acabamento envolvidas.

Para os dois casos de estudo será efetuado o estudo de cenários de forma a verificar que tipo de alterações poderiam fazer a diferença na circularidade do produto. Desta forma, será calculada a circularidade atual do produto e verificados quais os piores parâmetros para o mesmo, para assim projetar melhorias. Para o primeiro caso de estudo serão estudados cenários com menor refinamento uma vez que o produto se encontra já industrializado, ao contrário do segundo caso de estudo, onde se pretende testar e selecionar determinados parâmetros mais favoráveis à circularidade do produto.

4.3.1. Pontuação de Reutilização do Material (MRS)

O Indicador de Pontuação de Reutilização do Material é uma métrica que avalia a capacidade de um material em ser reutilizado e representa um cálculo que combina a fração de conteúdo reciclado ou rapidamente renovável com a fração de material reciclável, biodegradável ou compostável num produto.

Esta abordagem pretende criar incentivos para que as indústrias eliminem o conceito de “resíduo” ao projetar novos produtos com materiais que podem ser várias vezes reciclados para reter o seu valor.

Para calcular a Pontuação de Reutilização do Material é necessário seguir a seguinte metodologia:

1. Para cada material é necessário indicar a percentagem do seu conteúdo reciclável, biodegradável, rapidamente renovável e reciclado. De notar que não é necessária informação acerca da reutilização de todos os materiais homogêneos, apenas dos materiais com entrada de maior peso. Na Tabela 3 encontram-se resumidas as definições para material reciclável, biodegradável, rapidamente renovável e reciclado.

Tabela 3. Definição de conceitos para aplicação do indicador MRS

Material reciclável	Material que foi recuperado ou desviado do fluxo de resíduos sólidos não perigosos para fins de processamento e devolução para uso na forma de matérias-primas ou produtos [56].
Material biodegradável	Material que pode ser rapidamente decomposto por bactérias ou quaisquer outros organismos naturais, que os convertem em biomassa, dióxido de carbono e água, sem a geração de microplásticos. Para avaliar a capacidade de uma substância se decompor naturalmente no ambiente, devem ser realizados testes de biodegradabilidade da OCDE [57].
Material rapidamente renovável	Um material rapidamente renovável é valorizado pela sua capacidade de regeneração rápida e por ser considerado mais sustentável em comparação com materiais que requerem longos períodos de crescimento ou extração. Geralmente têm ciclos de dez anos ou menos [58].
Material reciclado	Material que foi processado e transformado a partir de resíduos ou produtos descartados, chamados de resíduos pós-consumo ou resíduos pré-consumo [59].
Material compostável	Produto capaz de sofrer degradação em ambientes controlados com a presença de microrganismos, humidade e calor, decompondo-se em compostos não tóxicos como <i>CO2</i> , água, compostos inorgânicos e biomassa [60].

2. Posteriormente somam-se as percentagens individuais dos materiais recicláveis, biodegradáveis ou compostáveis. Esta soma corresponde à “percentagem considerada reciclável ou biodegradável/compostável”.
3. Multiplicam-se as percentagens individuais do conteúdo reciclado e rapidamente renovável pela percentagem total de materiais contidos no produto, obtendo-se a “percentagem de conteúdo reciclado ou rapidamente renovável no produto”.

4. Por fim, é calculada a Pontuação de Reutilização do Material (MRS) utilizando a Equação (1), recorrendo às percentagens calculadas nas etapas anteriores. Com o resultado obtido, num intervalo entre 0 e 100, é atribuído um nível de reutilização ao produto conforme a Tabela 4.

$$MRS = \frac{\left[\begin{array}{l} \% \text{ produto reciclado} \\ \text{ou rapidamente renovável} \end{array} \right] + 2 \left[\begin{array}{l} \% \text{ produto reciclável} \\ \text{ou biodegradável/compostável} \end{array} \right]}{3} \times 100 \quad (1)$$

Tabela 4. Níveis do indicador MRS (Adaptado de [59])

Nível	Requisito
Básico	O produto tem MRS < 35. Cada material genérico do produto pertence a um ciclo biológico ou técnico.
Bronze	O produto tem MRS ≥ 35.
Prata	O produto tem MRS ≥ 50.
Ouro	O produto tem MRS ≥ 65.
Platina	O produto tem MRS = 100. O produto é ativamente recuperado ou reciclado através de um metabolismo técnico ou biológico.

4.3.2. Índice de Desejabilidade de Reciclagem (RDI)

O índice de desejabilidade da reciclagem tem como objetivo aumentar a reciclagem dos materiais, estimando o quão desejável é a reciclagem de um determinado produto. Desta forma, foi considerado este indicador para a aplicação no caso de estudo, uma vez que se pretende estimar a desejabilidade da reciclagem do produto, ao invés da deposição do mesmo em aterro ou incineração.

Para o cálculo deste indicador são necessárias três contribuições, nomeadamente o índice de simplicidade de separação dos materiais (D_S), o índice de segurança do material (D_{MSI}) e uma avaliação da maturidade tecnológica que avalia os conceitos, requisitos e capacidades da tecnologia de reciclagem para o produto em questão (D_{TRL}) [61].

$$RDI = D_S + D_{MSI} + D_{TRL} \quad (2)$$

A Equação 2 demonstra o cálculo do índice de desejabilidade da reciclagem, sendo para tal necessário a contribuição de alguns parâmetros. O índice de simplicidade de separação dos materiais (D_S), referido na Equação (3), trata-se do contrário do índice de complexidade da separação dos materiais.

$$D_{Simplicity} = 1 - \left(\frac{H}{H_{Top}} \right) \quad (3)$$

O índice de complexidade da separação dos materiais, avalia quantitativamente a dificuldade de separação dos materiais que constituem um produto. Este é quantificado pelo parâmetro H, baseado nas etapas necessárias para a separação dos materiais de um produto e o parâmetro H_{Top} que corresponde à escala superior do índice de complexidade de separação dos materiais ($H_{Top} = 3,5$).

O fator H pode ser calculado através da Equação (5), sendo necessário o cálculo prévio do fator C_i , representado na Equação (4), que corresponde à fração de massa do material a ser separado do produto montado [61].

$$C_i = \frac{M_i}{M_{Total}} \quad (4)$$

$$H = K \sum_{i=1}^M C_i \log C_i \quad (5)$$

Os fatores M_i e M_{Total} representados na Equação (4), correspondem à massa real do componente/material e à massa total do produto em kg, respetivamente. Na Equação (5), K representa o valor constante de (-1) para converter os valores negativos obtidos em positivos e M , o número de materiais que compõe os componentes de um produto.

O índice de segurança do material (D_{MSI}), pode ser calculado através da Equação (6), onde n representa o número máximo de um determinado tipo de material no produto, S_i o índice de segurança de um determinado material que compõe um componente do produto e S_{top} a escala superior do índice de segurança do material.

$$D_{MSI} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i S_i}{M_T S_{top}} \quad (6)$$

Relativamente ao cálculo do S_i , são considerados 8 fatores individuais que se enquadram em duas categorias, nomeadamente no risco associado ao material e no risco de fornecimento do mesmo. Na primeira categoria inserem-se fatores como: consumo global, falta de substituibilidade do material, potencial de aquecimento global (GWP) e a quantidade total de materiais necessários (TMR). Na segunda categoria, são considerados fatores como: a escassez, o monopólio de fornecimento, a instabilidade política e a vulnerabilidade do material em função das alterações climáticas. Estes fatores são classificados numa escala de 1 a 3, sendo que 1 indica que a severidade deste fator é considerada baixa e 3 é considerado um nível de severidade alto. No caso de existir falta de informação acerca de um material numa determinada categoria, é atribuída uma classificação de 2.

O elemento S_{top} corresponde à escala superior para o índice de segurança ($S_{top} = 24$), sendo que quanto mais próximo estiver o índice obtido S_i , maior é a insegurança do material em estudo. Para o cálculo do índice de segurança dos materiais presentes no produto, foi recorrido ao método utilizado na tabela presente no Anexo 5 [61].

Para o cálculo do último fator (D_{TRL}), é necessária a aplicação da Equação (7), onde n representa o número máximo de vezes que uma determinada tecnologia de reciclagem é utilizada num produto, R_i corresponde à avaliação do TRL da reciclagem para um material específico que compõe um componente do produto e R_{Top} que corresponde à escala superior do índice de maturidade tecnológica para a reciclagem de um determinado material ($R_{Top} = 9$), representada na Tabela 5.

$$D_{TRL} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i R_i}{M_T R_{Top}} \quad (7)$$

Tabela 5. Índice de avaliação de maturidade tecnológica

	TRL
Tecnologia aprovada com sucesso em condições reais (R_{Top})	9
Tecnologia pronta e qualificada por ensaios e demonstrações	8
Demonstrados múltiplos protótipos em ambiente operacional	7
Protótipo do sistema/subsistema demonstrado em laboratório ou ambiente similar	6
Validação do componente em ambiente relevante	5
Validação da tecnologia do componente em laboratório	4
Exploração do desempenho por experimentação analítica ou prova do conceito	3
Testes realizados e aplicação formulada	2
Princípios básicos observados e descritos	1

Finalmente, o resultado do RDI obtém-se numa escala que varia de 0 a 3, sendo que, quanto mais próximo o RDI de um produto estiver de 3, maior será a sua desejabilidade de reciclagem.

4.3.3. Indicador de Circularidade do Material (MCI)

O indicador de circularidade material (MCI) foi desenvolvido pela Ellen MacArthur Foundation e Granta Design [62], para medir o grau de circularidade de um produto em relação aos fluxos de materiais de um produto ou empresa, considerando o conteúdo reciclado de um produto juntamente com o desperdício e a sua utilidade [27]. Este indicador permite às empresas estimar o quão avançadas estão em termos de evolução de uma economia linear para circular, relativamente aos seus materiais e produtos [63].

Desta forma, torna-se pertinente o cálculo do MCI, uma vez que se trata de um dos indicadores mais relevantes e bem estruturados. Este permite avaliar a circularidade do produto e da empresa, medir a redução do uso de recursos naturais, o nível de perda de material valioso e também o aumento da utilização de recursos renováveis e recicláveis, bem como a durabilidade do produto [64].

Este indicador assenta em dois fatores principais, o índice de fluxo linear (*LFI*) e uma função de utilidade ($F(x)$) que tem em conta a duração e a intensidade do uso do produto, tal como se pode verificar na Equação (8) [62].

$$MCI_p = 1 - LFI * F(x) \quad (8)$$

O índice de fluxo linear (*LFI*) mede a proporção de material que flui de forma linear e integra no seu cálculo a massa de matéria-prima virgem utilizada na manufatura do produto (V), a massa de resíduos irrecuperáveis associados à produção e consumo (W), a massa do produto (M), a massa de resíduos não recuperáveis gerados no processo de reciclagem do produto (W_C) e a massa de resíduos não recuperáveis gerados durante a produção de matéria-prima reciclada do produto (W_F), como demonstrado na Equação (9).

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \quad (9)$$

A massa de matéria-prima virgem utilizada no produto é calculada através da Equação (10), sendo necessário o cálculo prévio da fração de matéria-prima derivada de materiais reciclados (F_R), a fração de matéria-prima derivada de fontes reutilizadas (F_U) e a fração dos materiais biológicos provenientes da produção (F_S) [62].

$$V = M(1 - F_R - F_U - F_S) \quad (10)$$

Para o cálculo da massa de resíduos não recuperáveis associados à produção e consumo (W) é utilizada a Equação (11) sendo necessário determinar previamente a massa de resíduos irre recuperáveis que são depositados em aterro, recuperados em energia ou qualquer outro tipo de processo onde o material não seja recuperado (W_0).

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \quad (11)$$

Assim, para o cálculo de W_0 , é aplicada a Equação (12), onde C_R representa a fração da massa do produto recolhida para reciclagem no fim da sua fase de uso, C_U a fração da massa do produto que vai para reutilização de componentes, C_C a fração da massa do produto recolhido para o processo de compostagem e C_E a fração de massa de um produto recolhida para recuperação de energia.

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U - C_C - C_E) \quad (12)$$

Os fatores W_F e W_C podem ser calculados a partir da Equação (13) e Equação (14), onde E_F representa a eficiência do processo de reciclagem usado para produzir a matéria-prima reciclada e E_C , a eficiência do processo de reciclagem usado para reciclar um produto no fim de vida.

$$W_F = \frac{M(1 - E_F)F_R}{E_F} \quad (13)$$

$$W_C = M(1 - E_C)C_R \quad (14)$$

Finalmente, para o cálculo da função utilidade $F(x)$ é utilizada a Equação (15), sendo necessária a determinação prévia de x , que pode ser calculado a partir da Equação (16), onde L corresponde à vida útil do produto, L_{av} a vida útil média de produtos semelhantes na indústria, U diz respeito à intensidade de uso do produto e U_{av} a intensidade de uso de produtos semelhantes na indústria.

$$F(x) = \frac{0.9}{x} \quad (15)$$

$$x = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) * \left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad (16)$$

O MCI mede o nível de circularidade numa escala de 0 a 1, portanto os produtos irão situar-se algures entre esses dois extremos conforme o seu nível de circularidade. Quanto mais alta for a pontuação do MCI, mais circular e sustentável é o sistema, uma vez que minimiza a extração de recursos naturais e reduz os resíduos e poluição associados à produção e fim de vida dos materiais.

4.3.4. Indicador Protótipo de Economia Circular (CEIP)

O Indicador Protótipo de Economia Circular (CEIP) é uma ferramenta utilizada para avaliar o desempenho do produto no âmbito da economia circular. Esta ferramenta consiste num conjunto de perguntas divididas em cinco estágios do ciclo de vida, sendo os resultados exibidos de acordo com os limites de desempenho mínimo e máximo da circularidade [27].

Partindo dos cinco estágios do ciclo de vida (Design; Manufatura; Comercialização; Em uso; Fim de Uso), o CEIP combina medidas quantitativas e qualitativas para a classificação do produto, avaliação, pontuação e uma representação visual da circularidade do mesmo. O CEIP possibilita a avaliação da circularidade de produtos, em que as estratégias da Economia Circular são priorizadas, como por exemplo, a maior pontuação (20 pontos) é dada ao conteúdo reciclado/reutilizado no produto, enquanto a desmaterialização detém apenas 2 pontos. Além disso, o CEIP considera também possíveis modelos de negócios circulares, como o aluguer ou de devolução [27].

Na Tabela 6 encontram-se apresentadas as classificações do indicador para cada estágio do ciclo de vida do produto.

Tabela 6. Classificações do indicador CEIP

Etapa	Questão	Variável a avaliar	Pontuação
Design/Redesenho	O produto é feito de material reciclado/reutilizado?	Seleção de material	20
	O produto é mais leve que a versão anterior?	Desmaterialização	2
	Existe uma lista completa de materiais e substâncias envolvidas no produto?	Identificação do material	5
Produção	Existe uma lista completa da energia necessária para o processo de produção?	Identificação da energia	10
	Existe uma lista completa de resíduos sólidos originários do processo produtivo?	Gestão de resíduos industriais	15
Comercialização	Que embalagem está a ser utilizada?	Embalagem do produto	5
	Qual a garantia do produto?	Extensão da vida do produto	10
	Existe uma opção de aluguer para o produto?	Acesso ao produto	15
Em uso	Pode o <i>status</i> do uso e identificação do produto ser estabelecida?	Extensão da vida do produto	15
	Pode o produto ser reconicionado?	Extensão da vida do produto	5
	Pode o produto ser reutilizado?	Extensão da vida do produto	10
	O produto em uso reduz o desperdício?	Redução de resíduos	5
Fim de uso	Existe um esquema de devolução viável (<i>take-back</i>) para este produto?	Recuperação do produto	15
	É um produto separável de outros produtos em fim de vida?	Recuperação do produto	10
	Os materiais do produto podem ser devolvidos à cadeia de abastecimento?	Recuperação do produto	10
			152

4.3.5. Indicador de Eficiência de Recursos Baseado no Valor (VRE)

O Indicador de Eficiência de Recursos Baseado no Valor (VRE) mede a eficiência com que os recursos são usados para gerar valor económico. O VRE pode ser usado para comparar a eficiência de recursos entre empresas de setores diferentes, bem como para monitorizar a eficiência de recursos de uma empresa ao longo do tempo. Isto pode ajudar as empresas a identificar áreas onde podem melhorar a sua eficiência de recursos e, assim, aumentar o valor criado para os seus acionistas. Assim, a elevada pontuação do indicador VRE indica que a empresa usa os seus recursos de forma eficiente e cria valor [65].

O indicador de eficiência de recursos é calculado utilizando a Equação (17), onde Y representa o valor de saída, X_i os recursos em volume e W_i o peso dos recursos.

$$VRE = \frac{Y}{\sum_i W_i X_i} \quad (17)$$

O valor de Y pode ser definido tanto a nível de processo como de produto, sendo que na Equação 17 é considerado como valor agregado da indústria ao longo da cadeia de valor e na Equação 18 refere-se à multiplicação do preço de venda final de produto pelo número de unidades de produção final [65].

Preferencialmente, para medir a eficiência dos recursos, W_i representaria o impacto ambiental e social da utilização dos recursos na produção p , no entanto, estas informações geralmente não são disponibilizadas pelas empresas. Desta forma, nas economias baseadas no mercado, substitui-se o peso dos recursos pelo preço de mercado e energia, que refletem tanto a qualidade como a escassez destes.

Por fim, ao contrário de outras medidas de eficiência, os *inputs* considerados afetam tanto o numerador quanto o denominador. Ou seja, o valor agregado é igual à produção bruta (GO) menos os *inputs* intermediários (II), onde E, M, S é o valor de entrada de energia, material e serviços, respetivamente (Equação (18)).

$$Y = GO - II = GO - E - M - S \quad (18)$$

Deduzindo a equação anterior, obtém-se a equação (19)

$$VRE = \frac{GO - E - M - S}{E + M} = \frac{GO - S}{E + M} - 1 \quad (19)$$

Desta forma, este indicador torna-se importante uma vez que permite às organizações identificar oportunidades de melhoria relativamente à eficiência do uso de recursos, otimização de processos, redução de desperdícios, aumentando consequentemente a rentabilidade [65].

4.3.6. Diretrizes de design circular (CDG)

Os designers desempenham um papel fundamental para promover a sustentabilidade e eficiência de recursos ao longo de todo o ciclo de vida do produto, devido à sua posição em estágios iniciais do processo de desenvolvimento do mesmo. Desta forma, possuem um impacto significativo na forma como os produtos são concebidos, fabricados, utilizados e descartados em fim de vida, desempenhando um papel crucial na transição de um modelo de economia linear para circular.

Assim, os designers tornam-se responsáveis por proporcionar alternativas mais sustentáveis para o design do produto, sendo desta forma necessário que os mesmos possuam diretrizes para orientar o produto no caminho da economia circular.

Nesse sentido, surgem as diretrizes de design circular (CDG), uma ferramenta que visa identificar diretrizes que permitem a melhoria do design de produto numa perspectiva de economia circular [66]. Estas diretrizes para o design circular são divididas em 5 grupos relacionados com os princípios chave da economia circular:

1. Extensão de vida útil: inclui as diretrizes de design relacionadas com a promoção da vida útil e durabilidade dos produtos, através do desenvolvimento de designs atemporais, que garantam ao produto a possibilidade de ser usado pelo maior tempo possível;

2. Desmontagem: abrange diretrizes de design relacionadas com a estrutura do produto e o acesso aos seus componentes, fazendo a distinção entre:

- Conectores: inclui diretrizes de design relacionadas com os sistemas de união para facilitar a desmontagem;
- Estrutura do produto: inclui diretrizes de design relacionadas com a localização dos componentes para facilitar o acesso aos mesmos.

3. Reutilização do produto: engloba diretrizes de design que facilitam a reutilização completa do produto, tornando mais fácil as tarefas de manutenção, limpeza e desmontagem dos componentes envolvidos;

4. Reutilização de componentes: diretrizes para facilitar a reutilização de componentes do produto utilizando componentes padronizados, minimizando o número de peças;

5. Reciclagem de materiais: diretrizes com o objetivo de tornar mais fácil a identificação, separação e reciclagem dos materiais utilizados no produto.

Uma vez definidas as diretrizes de design circular necessárias a um projeto, estas são classificadas conforme a margem de melhoria de cada uma das mesmas e na relevância de cada diretriz de design circular para uma categoria do produto específica [66].

A margem de melhoria permite avaliar em que medida é necessário melhorar o design de um produto para incorporar as diretrizes de economia circular. Para tal, é definida com base em três níveis, tal como representado na Tabela 7.

Tabela 7. Avaliação e critérios para a margem de melhoria [66]

Margem de melhoria	Descrição
Alta (3)	A diretriz de design circular não é apresentada ou é muito pouco atendida no design do produto.
Média (2)	A diretriz de design circular é atendida de forma razoável no design do produto.
Baixa (1)	A diretriz de design circular é totalmente atendida no design do produto.

No entanto, dependendo da categoria do produto, a incorporação das diretrizes no grupo específico de design circular pode ser mais ou menos significativa. Portanto, é necessário incorporar um critério adicional, capaz de integrar a relevância que cada grupo de diretrizes de design circular tem para a categoria do produto em estudo, de acordo com suas funções, vida útil, durabilidade, desempenho, etc. [66]. Para tal, a relevância é também definida com base em três graus, como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Avaliação e critérios para a relevância [66]

Relevância	Descrição
Alta (3)	O grupo de diretrizes de design circular é essencial para a categoria em estudo.
Média (2)	O grupo de diretrizes de design circular é razoavelmente essencial para a categoria em estudo.
Baixa (1)	O grupo de diretrizes de design circular é pouco essencial para a categoria em estudo.

Posteriormente, ambos os critérios (margem de melhoria e relevância) são multiplicados, sendo com o resultado, elaborado um diagrama para identificar as diretrizes de design circular que devem ser incorporadas num projeto com a finalidade de o melhorar numa perspetiva circular.

5.1. Caso de estudo 1

5.1.1. Pontuação de Reutilização do Material (MRS)

Relativamente ao indicador de pontuação de reutilização do material, foram aplicados dois cenários diferentes, possibilitando retirar conclusões acerca do tipo de materiais utilizados e a sua respetiva percentagem. Assim sendo, o cenário base ilustra as condições reais de produção da peça, sendo, portanto, elaborado para a mesma contendo a montagem das molas metálicas. Desta forma, tal como referido anteriormente, tratando-se este de um produto que contém molas metálicas, a entidade recicladora da empresa não consegue efetuar a sua extração, pelo que a reciclagem do mesmo se torna inviável. A percentagem de material reciclado foi considerada nula, uma vez que os jitos de PC/ABS reincorporados diretamente no processo não são classificados como material reciclado para este indicador. Isto deve-se ao facto de o material incorporado ser reutilizado no mesmo processo, ou seja, proveniente de resíduos pré-consumo na produção do mesmo produto.

No que diz respeito ao cenário 1, foi estudada a possibilidade de existir um sistema capaz de remover as molas metálicas do produto, sendo, portanto, o produto integralmente passível de reciclagem. Relativamente ao cenário 2, este aborda o aumento da percentagem de material reciclado para 20%, podendo este ser proveniente de resíduos pós-consumo que podem ser recolhidos através de um sistema *take-back* do mesmo produto ou então de produtos diferentes, fabricados a partir da mesma matéria-prima.

Os dados utilizados para o cálculo do indicador MRS de cada cenário encontram-se dispostos na Tabela 9.

Tabela 9. Cenários para o indicador MRS

	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2
% material reciclável	0%	100%	100%
% material biodegradável	0%	0%	0%
% material rapidamente renovável	0%	0%	0%
% material reciclado	0%	0%	20%

Na Figura 27 estão representados os gráficos representativos do nível de reutilização do material para cada um dos cenários em estudo.

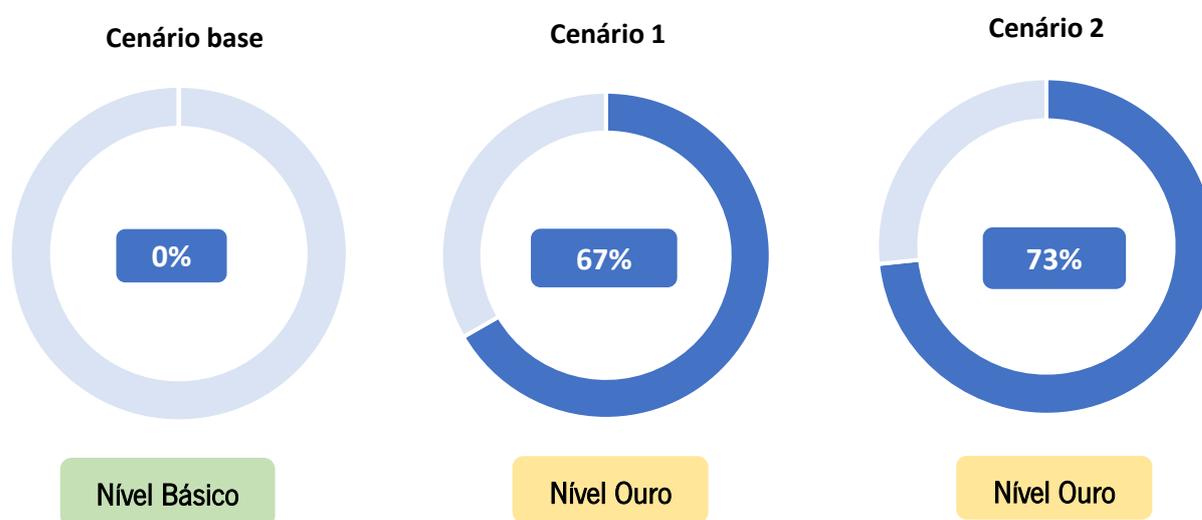


Figura 27. Resultados obtidos para os diferentes cenários do indicador MRS

Através da análise do gráfico referente ao cenário base, verifica-se que o produto se encontra no nível básico, pelo facto de o mesmo não ser atualmente passível de reciclagem.

Para o cenário 1, verifica-se que o facto de existir um sistema de remoção das molas metálicas do produto, faz com que o indicador aumente substancialmente a sua percentagem, atingindo o nível ouro. Constata-se, portanto, que apenas com a implementação deste sistema, o produto é capaz de aumentar em 67% a sua circularidade.

Relativamente ao cenário 2, é possível constatar que a introdução de uma percentagem de 20% de material reciclado no produto resulta num ligeiro aumento do indicador, mantendo a atribuição do mesmo patamar.

5.1.2. Índice de Desejabilidade da Reciclagem (RDI)

Para determinar este indicador optou-se por distinguir este índice entre peças pintadas e não pintadas, de forma a verificar o impacto que a tinta poderá ter no desempenho do indicador. Assim, para efeitos de cálculo foi necessário considerar o índice de segurança dos materiais usados, que neste caso são o PC/ABS, a borracha TPS e ainda a tinta no caso da peça pintada.

No que diz respeito ao fator D_{TRL} , é necessária a análise dos materiais constituintes do produto quanto ao seu nível de maturidade tecnológica de reciclagem, conforme a classificação apresentada na Tabela 5 do Capítulo 4. Para este produto foi considerado um R_i de 9 para o material plástico e também para as molas metálicas, uma vez que a reciclagem para este tipo de materiais está suficientemente maturada e desenvolvida. Relativamente à tinta utilizada foi considerado um R_i de 8, pelo facto de existir tecnologia de reciclagem capaz de reciclar material pintado, no entanto, esta não estar suficientemente desenvolvida.

Na Tabela 10 encontram-se compiladas as classificações relativas ao índice de segurança dos materiais presentes no produto, seguindo o modelo apresentado no Anexo 5. É importante referir para este parâmetro do indicador, que o seu efeito é contrário, ou seja, quanto maior o índice de segurança do material, menos seguro este é.

O índice de segurança do PC/ABS foi calculado com base em informação recolhida acerca dos plásticos de origem fóssil, resultando numa classificação final de 12. Relativamente à borracha TPS, o seu índice de segurança pode variar dependendo da composição química e condições de uso. Em geral, o TPS é considerado um material seguro e não-tóxico, podendo ser reciclado e reutilizado, tendo sido atribuída uma classificação de 13.

No que diz respeito à tinta de base solvente, é importante realçar o seu potencial de aquecimento global, uma vez que muitos dos solventes utilizados na sua formulação são derivados de petróleo e outros combustíveis fósseis. Além disso, a produção e o transporte dos solventes e outros materiais utilizados no fabrico da tinta podem também gerar emissões de gases de efeito estufa, resultando numa classificação de 17 [67]. Relativamente às molas de aço, foi considerado o índice de segurança do ferro, com base nos valores apresentados no Anexo 5, uma vez que o aço se trata de uma liga metálica composta por aproximadamente 98,5% de Fe (ferro). Por esta razão, a aproximação ao ferro pode ser considerada válida para a construção da tabela.

Tabela 10. Cálculo do índice de segurança dos materiais no produto

	Risco para o Material				Risco de Fornecimento				Índice de segurança
	Consumo Global	Substituibilidade	Potencial de aquecimento global	Necessidade total de material	Escassez	Monopólio de Fornecimento	Instabilidade política	Vulnerabilidade com alterações climáticas	
PC/ABS T65	3	1	2	1	1	2	1	1	12
Borracha TPS	3	2	2	1	1	2	1	1	13
Tinta base solvente	3	1	3	2	2	2	2	2	17
Aço	3	3	1	1	1	2	2	2	15

Assim, recorrendo às equações apresentadas no capítulo anterior, obtêm-se os resultados para as três contribuições do índice de desejabilidade da reciclagem, representados na Tabela 11. No anexo 6 encontram-se detalhados os cálculos efetuados para este indicador.

Tabela 11. Valores obtidos para o cálculo do RDI

	D_S	D_{MSI}	D_{TRL}	RDI
<i>Peça injetada</i>	0.99	0.50	1	2.49
<i>Peça pintada</i>	0.98	0.49	0.99	2.46

Pela análise dos resultados, verifica-se que os valores se encontram relativamente próximos para a peça injetada e pintada. Desta forma, é possível constatar que a existência de um tratamento de superfície tem influência na sua desejabilidade de reciclagem, no entanto, o facto da percentagem de tinta utilizada no produto ser pouco significativa, leva a que o indicador apresente resultados semelhantes para os dois cenários. Contudo, o resultado inferior obtido para a peça pintada, pode ser explicado pelo facto de, para a peça pintada, a tinta utilizada conter substâncias químicas prejudiciais ao meio ambiente, como metais pesados ou solventes voláteis. Estas substâncias podem também ser problemáticas durante o processo de reciclagem, uma vez que podem contaminar outros materiais ou libertar poluentes para o ambiente.

5.1.3. Indicador de Circularidade do Material (MCI)

Para o cálculo do indicador de circularidade do material foram necessários alguns dados relativos à peça *Dekorblende BFS RL*. Na Tabela 12 foram registados os dados mais importantes para o cálculo do MCI para o cenário base. De notar que, o fator E_C não foi determinado, uma vez que, neste momento, o produto não é reciclado em fim de vida, pelo que não é possível determinar a eficiência desse processo.

Tabela 12. Dados utilizados no cálculo do MCI

	M	F_R	F_U	F_S	C_R	C_U	C_C	C_E	E_F	E_C	L	L_{av}	U/U_{av}
<i>Dekorblende BFS RL</i>	307.7 g	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	n.a	10 anos	10 anos	1

Na Tabela 13, estão representados os valores obtidos nos cálculos intermédios, recorrendo às equações mencionadas no Capítulo 4, bem como o resultado do indicador MCI.

Tabela 13. Valores obtidos nos cálculos intermédios e resultado do MCI

	V	W_0	W_F	W_C	W	LFI	$F(x)$	MCI
<i>Dekorblende BFS RL</i>	289 g	307.7 g	0	0	307.7 g	0.970	0.9	0.127

Analisando o resultado obtido para o indicador MCI, verifica-se que este possui um valor bastante baixo. Este resultado deve-se ao facto de o fluxo de materiais do produto ser, atualmente, linear, ou seja, o produto não é recolhido para reciclagem ou recuperação de energia no seu fim de vida.

Apesar de este produto estar já industrializado, e, portanto, não ser possível a alteração do mesmo, foram elaborados três cenários possíveis de implementar nesta fase, com o intuito de verificar o impacto de ligeiras mudanças relativamente à circularidade do mesmo. Os resultados destes cenários são apresentados na Tabela 14.

O primeiro cenário consiste no aumento da incorporação de material reciclado para 20%, que se reflete numa breve melhoria do indicador. Para o cenário 2, é estudado o efeito da existência de um sistema de recolha de produtos (*take-back*), com eficiência de 30%, e simultaneamente aumentada a percentagem de material reciclado.

O cenário 3 considera, para além da incorporação de reciclado e do sistema *take-back*, a existência de uma tecnologia de reciclagem para o fim de vida deste produto. Atualmente, não é possível a existência de um sistema de reciclagem 100% eficiente, portanto, considerando que existem perdas aquando o processo de reciclagem, foi considerada uma eficiência de 95%.

Tabela 14. Cenários elaborados para o indicador MCI

	Fração material reciclado (F_R)	Sistema <i>take-back</i> (C_R)	Eficiência da tecnologia de reciclagem (E_C)	MCI
<i>Cenário 1</i>	20%	-	-	0.190
<i>Cenário 2</i>	30%	30%	-	0.245
<i>Cenário 3</i>	30%	30%	95%	0.363

Como se pode constatar, a alteração de pequenos fatores, tais como a incorporação de material reciclado ou a existência de uma tecnologia de reciclagem, revelam-se aspetos de grande importância para a circularidade de um produto. Neste caso, pode verificar-se que a circularidade do produto para o cenário mais otimista (cenário 3) aumentou cerca de 3 vezes em relação ao cenário real. Assim, os cenários sugeridos poderiam ser determinantes para a circularidade e passíveis de serem implementados ao produto atual.

5.1.4. Indicador de Eficiência de Recursos baseado no Valor (VRE)

O indicador de eficiência de recursos baseado no valor exige que sejam consideradas: a energia consumida em todas as etapas de produção, a matéria-prima e os serviços a que o produto é sujeito. Desta forma, devem ser considerados os consumos em todas as etapas produtivas, desde a etapa de injeção, pintura, até à montagem.

Para determinar o consumo médio de energia na produção da peça, foi traçado um gráfico da potência consumida em função do tempo de ciclo. Estes dados foram obtidos de forma instantânea a partir de uma máquina ENGEL, sendo os mesmos apresentados no Anexo 7.

Relativamente à máquina de pintura *Verjakob* e de montagem, realizou-se a medição da corrente que alimenta a máquina com o auxílio de uma pinça amperimétrica (Figura 28). Para efeitos de cálculo, considerou-se que todas as linhas do sistema trifásico apresentavam a mesma intensidade de corrente (sistema equilibrado), cujo potencial elétrico (U) e ângulo de desfasamento entre cada linha de alimentação (φ) assumem um valor de 400 V e 30°, respetivamente.



Figura 28. Pinça amperimétrica

Para o cálculo dos valores de potência e energia consumida, tendo em conta o período de horas de atuação, foram utilizadas a Equação [20] e [21].

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\varphi) \quad [20]$$

$$E = P \times \Delta t \quad [22]$$

Posto isto, obtém-se um valor de consumo energético de 84159.6 kWh, considerando os processos de injeção, pintura e montagem, desde 1 de janeiro até 30 de novembro.

Para o cálculo dos serviços associados ao processo de injeção das peças, a sua pintura e a montagem das molas, é necessário considerar os custos associados a cada processo com base na tarifa da máquina ($T_{máq./h}$) e tarifa do operador por hora ($T_{op./h}$), respetivo tempo de ciclo e número de cavidades/peças por ciclo (Equação [23]).

$$C_{processo/peça} = \frac{T_{máquina} + (T_{operador} \times n^{\circ}operadores)}{3600} \times \frac{t_{ciclo}}{n^{\circ}cavidades} \quad [23]$$

Neste caso, para o processo de injeção e sabendo que o tempo de ciclo é de 82.97 s, obtém-se o custo aproximado de 0.74 € para a injeção de 1 peça/ciclo. Para os restantes processos, pintura e montagem, é repetido o mesmo procedimento para o cálculo dos serviços.

O valor obtido é agora multiplicado pelo número de peças para cada processo, de forma a alcançar o valor de entrada dos serviços. Visto as embalagens para o transporte das peças serem retornáveis, ou seja, fornecidas pelo cliente, foram desconsideradas para efeitos de cálculo.

Relativamente aos consumos de matéria-prima, estes englobam o matéria-prima utilizada para a peça injetada (PC/ABS e TPS) e a tinta Schwarz HG, tendo em conta a sua utilização aproximada descrita no Anexo 8.

Os resultados para cada um dos fatores necessários ao cálculo do indicador VRE foram compilados na Tabela 15, para a melhor compreensão dos mesmos.

Tabela 15. Dados necessários ao cálculo do indicador VRE

	Processo	Energia	Serviços	Matéria-Prima
X	Injeção	67 295.92 kWh	51 106	71 208.24 kg
	Pintura	4186.74 kWh		4778.79 kg
	Montagem	259.72 kWh		-
P	Injeção	0.29 €	0.74 €	1.11 €
	Pintura		0.35 €	10.54 €
	Montagem		0.06 €	-

Na Tabela 16 estão representados os resultados obtidos para o indicador VRE. Os cálculos para este indicador podem ser consultados de forma mais pormenorizada no Anexo 8.

Tabela 16. Resultados obtidos para o indicador VRE

GO	1021608.9
M	129084.8
S	67520.26
E	20891.38
VRE	5.36

O indicador VRE refere-se ao valor de venda do produto sobre os custos relacionados com a energia, materiais e serviços. Desta forma, o resultado obtido de 5,36 significa que o valor acrescentado ao produto é 5 vezes superior aos gastos da sua produção. Assim, o valor obtido para este indicador pode ser considerado bom, uma vez que os gastos com energia, materiais e serviços estão bastante abaixo do valor a que o produto foi vendido.

5.1.4. Indicador Protótipo de Economia Circular (CEIP)

O Indicador Protótipo de Economia Circular (CEIP) tem como objetivo medir o desempenho da economia circular através de um conjunto de perguntas aplicadas ao produto e a diferentes fases de ciclo de vida do mesmo, sendo os resultados exibidos de acordo com os limites de desempenho mínimo e máximo da circularidade. A utilização deste indicador é importante para a avaliação da circularidade do produto na etapa de desenvolvimento, visto consistir num conjunto de perguntas divididas em cinco estágios do ciclo de vida do produto (design, produção, comercialização, uso e fim de uso).

A partir de um conhecimento prévio acerca do produto em questão, é possível dar resposta a cada uma das questões presentes no indicador, permitindo assim retratar o cenário atual do produto. Por este se tratar de um indicador abrangente do ciclo de vida do produto, será possível verificar qual a fase do produto que estará a limitar a circularidade do mesmo.

Na Tabela 17 encontram-se registadas as respostas a cada uma das perguntas do indicador CEIP para o cenário atual do produto, bem como a pontuação atribuída. As perguntas são agrupadas por estágio do ciclo de vida e respondidas com sim/não, com uma única pontuação agregada que demonstra a circularidade do produto.

Tabela 17. Resultados para o indicador CEIP

Etapa	Questão	Cenário atual	Pontuação
Design/ Redesenho	O produto é feito de material reciclado/reutilizado?	Sim	20
	O produto é mais leve que a versão anterior?	Não	0
	Existe uma lista completa de materiais e substâncias envolvidas no produto?	Sim	5
Produção	Existe uma lista completa da energia necessária para o processo de produção?	Sim	10
	Existe uma lista completa de resíduos sólidos originários do processo produtivo?	Sim	15
Comercialização	Que embalagem está a ser utilizada?	Retornável	5
	Existe garantia do produto?	Sim	10
	Existe uma opção de aluguer para o produto?	Não	0
Em uso	Pode o status do uso e identificação do produto ser estabelecida?	Sim	15
	Pode o produto ser recondicionado?	Não	0
	Pode o produto ser reutilizado?	Não	0
	O produto em uso reduz o desperdício?	Não	0
Fim de uso	Existe um esquema de devolução (<i>take-back</i>) viável para este produto?	Não	0
	É um produto separável de outros produtos em fim de vida?	Não	0
	Os materiais do produto podem ser devolvidos à cadeia de abastecimento?	Não	0
		TOTAL	80

A Tabela 18 representa a classificação e avaliação do produto, tendo em conta a pontuação obtida no indicador CEIP para o cenário atual.

Tabela 18. Classificação e avaliação do produto

Avaliação do produto	Classificação do produto	Pontuação	
		Obtida	Disponível
52.63%	Bom	80	152

A pontuação obtida no indicador foi expandida para um diagrama radar (Figura 29), de forma a ser mais perceptível a avaliação da circularidade em diferentes partes do ciclo de vida do produto. A azul está representada a pontuação obtida para a circularidade do produto em questão.

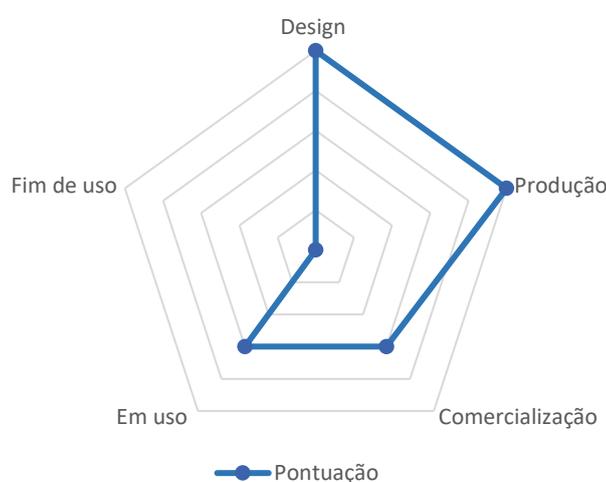


Figura 29. Diagrama radar para o indicador CEIP

Através da análise do gráfico, verifica-se que em termo produtivos e de design do produto, a sua avaliação é máxima. No entanto, é importante salientar que as fases mais problemáticas do ciclo de vida do produto são as fases de comercialização, uso e fim de uso. No que toca à fase de uso, o facto de o produto não poder ser recondicionado ou reutilizado não beneficia o resultado do indicador para esta etapa. Isto realça a necessidade em criar produtos que possam ser devidamente desmontados e separados, para a sua posterior reutilização e recondicionamento.

Relativamente à fase de fim de uso, verifica-se também a necessidade e vantagem em criar um sistema *take-back* para a recolha de produtos em fim de vida. Neste sistema, a empresa seria responsável por recolher e reciclar ou reutilizar os produtos que a mesma produziu ou vendeu. Depois disso, os produtos seriam desmontados, separados em diferentes materiais e encaminhados para o processo de reciclagem ou reutilização. No entanto, a eficácia dos sistemas de *take-back* para plásticos depende da capacidade de reciclagem do material, que pode variar dependendo do tipo de plástico e da

qualidade do material. Alguns tipos de plástico são mais fáceis de reciclar do que outros, e a qualidade do material reciclado pode ser afetada por fatores como a contaminação ou a degradação do material.

5.2. Caso de estudo 2

5.2.1. Pontuação de Reutilização do Material (MRS)

Relativamente ao indicador de pontuação de reutilização do material, foi inicialmente calculado o cenário real, ou seja, o cenário que corresponderá às condições reais de produção da peça. Apesar da peça não estar ainda em fase de produção, sabe-se que a fração de material reciclado a incorporar será de cerca de 20% em cada um dos componentes do conjunto. Este material é considerado reciclado, uma vez que é proveniente de uma refinaria, ou seja, da refinação de polímeros já existentes, que são processados para obter novos produtos.

Este produto é também constituído pela soldadura de um componente reforçado com fibra de vidro, o que inviabiliza a reciclagem de todo o produto. Desta forma, foi atribuído ao cenário base uma percentagem de produto reciclável de 0%, uma vez que neste momento, não é possível reciclar material soldado reforçado com fibra de vidro.

Caso o componente reforçado com fibra de vidro não fosse soldado aos restantes componentes e a remoção das duas molas metálicas do produto fosse possível, todo o restante produto poderia ser recolhido e reciclado em conjunto, visto as matérias-primas de cada um dos componentes serem compatíveis. Desta forma, foi elaborado o cenário 1, considerando 80% do produto reciclável.

O cenário 2, ilustra a possibilidade de não incorporar material reforçado com fibra de vidro no produto e a desmontagem das molas metálicas ser possível, sendo, portanto, inteiramente reciclável. Já o cenário 3 representa um cenário hipoteticamente ideal, de forma a demonstrar alternativas mais sustentáveis ao produto, visto este se encontrar ainda em fase de desenvolvimento. Neste cenário, foi estudada a possibilidade de incorporar material rapidamente renovável a partir de componentes reutilizáveis, tendo sido considerado 25% do produto reutilizado. Esta percentagem foi atribuída com base na possibilidade de separação e recolha de componentes do produto, com a existência de um sistema *take-back*. Neste caso, foi colocada a hipótese de o componente reforçado com fibra de vidro retornar à empresa para ser reutilizado, uma vez que não poderia ser reciclado, sendo encaminhado para aterro.

Os dados utilizados para o cálculo do indicador MRS de cada cenário encontram-se dispostos na Tabela 19.

Tabela 19. Cenários para o indicador MRS

	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
% material reciclável	0%	80%	100%	100%
% material biodegradável	0%	0%	0%	0%
% material rapidamente renovável	0%	0%	0%	25%
% material reciclado	20%	20%	20%	25%

Na Figura 30 estão caracterizados os gráficos representativos do nível do indicador MRS para cada cenário estudado.

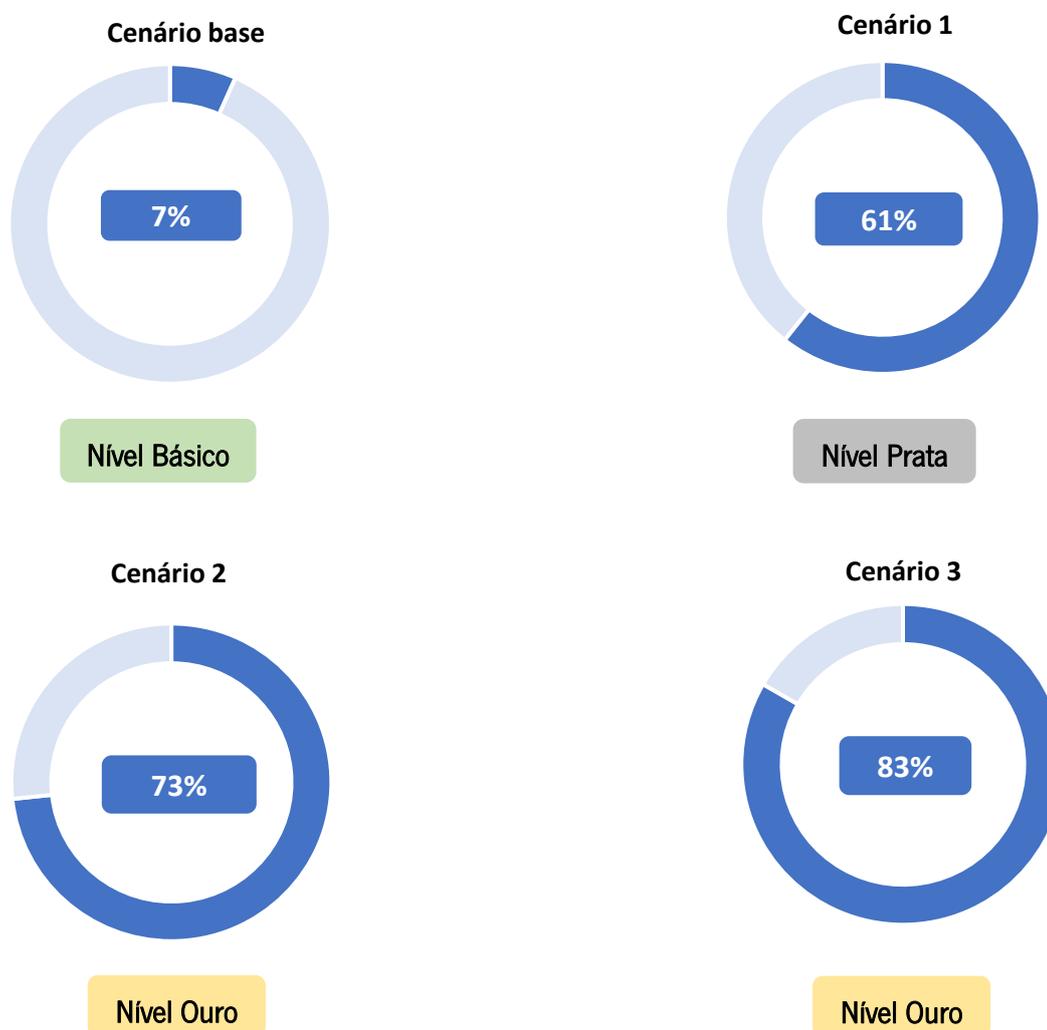


Figura 30. Resultados obtidos para os diferentes cenários do indicador MRS

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o cenário base se encontra no nível básico, pelo facto de ser incorporado material reciclado no produto e posteriormente não existir recuperação do mesmo em fim de vida, não sendo isso contributivo para a circularidade.

Pelo contrário, o cenário 1 representa a possibilidade do componente reforçado com fibra de vidro não ser soldado ao conjunto, sendo assim possível a reciclagem dos restantes componentes do produto. Neste caso, verifica-se uma subida considerável de patamar do indicador MRS para o nível Prata.

Relativamente ao cenário 2 verifica-se um ligeiro aumento da percentagem do indicador, que se revela numa ascensão de patamar, pelo facto de ser considerado que o produto não inclui fibra de vidro na sua composição, tornado todos os seus componentes compatíveis e assim 100% recicláveis, podendo a peça ser soldada.

Por fim, no que se refere ao cenário 3, dado ser incluído material reutilizado na constituição do produto, é obtido um resultado mais satisfatório em termos percentuais, contudo não se traduz numa subida de patamar.

5.2.2. Índice de Desejabilidade da Reciclagem (RDI)

Para o cálculo do índice de desejabilidade da reciclagem (*RDI*) é necessário inicialmente calcular o índice de simplicidade de separação dos materiais (D_s) para cada um dos materiais presentes no produto. Para tal, foi calculado o elemento C_i para cada um dos componentes e, posteriormente, calculado o somatório desses mesmos valores para obter o fator D_s . No anexo 9 estão representados os cálculos para este fator.

O índice de desejabilidade da reciclagem implica a classificação do índice de segurança dos materiais (S_i) que compõe o produto. Neste caso, com base em informação previamente recolhida acerca de determinados tipos de plástico, foram atribuídas as classificações apresentadas na Tabela 20, para cada categoria do índice de segurança do material. Relativamente às molas, foi calculado o índice de segurança do aço, recorrendo à tabela presente no Anexo 5.

Tabela 20. Cálculo dos índices de segurança dos materiais constituintes do produto

	Risco para o Material				Risco de Fornecimento				Índice de segurança
	Consumo Global	Substituibilidade	Potencial de aquecimento global	Necessidade total de material	Escassez	Monopólio de Fornecimento	Instabilidade política	Vulnerabilidade com alterações climáticas	
PC/ABS	3	1	2	1	1	2	2	1	13
ABS	3	1	2	1	1	2	2	1	13
PC/ABS 10% GF	2	1	3	1	2	2	2	1	14
Aço	3	3	1	1	1	2	2	2	15

Como anteriormente referido, um dos componentes do produto incorpora 10% de fibra de vidro na sua constituição. Desta forma, foi elaborado um cenário que permite avaliar e retirar conclusões acerca da simplicidade de separação dos materiais, o nível de segurança do material e a maturidade da tecnologia de reciclagem disponível, para assim, verificar o impacto da adição de fibra de vidro no produto. Este cenário consiste em tornar os materiais constituintes do produto compatíveis, ou seja, supor que o componente reforçado com fibra de vidro é apenas constituído por PC/ABS, sem a adição da fibra.

Assim, o cenário base retrata o cenário real da peça, em que é adicionado 10% de fibra de vidro ao componente e o cenário 1 sem a adição de fibra de vidro. Desta forma, para o cenário real são consideradas 4 matérias-primas distintas e para o cenário 1, somente 3 matérias-primas. Na Tabela 21 estão representados os resultados para os cenários elaborados.

Tabela 21. Resultados do indicador RDI para diferentes cenários

	D_S	D_{MSI}	D_{TRL}	RDI
<i>Cenário base (10% FV)</i>	0.87	0.55	0.98	2.40
<i>Cenário 1 (0% FV)</i>	0.92	0.54	1	2.46

Como se pode verificar, o resultado para indicador RDI para os cenários propostos, comprova que é mais desejável reciclar um produto quando este não possui fibra de vidro na sua composição.

Contudo, não existem diferenças significativas entre os resultados, uma vez que a fibra de vidro somente corresponde a 10% de um componente do produto em estudo.

No que toca ao fator D_s , afere-se que a simplicidade de separação dos materiais aumenta para o cenário 1, confirmando que é mais simples separar uma peça que não contenha fibra de vidro. Já no que se refere ao fator D_{MSI} para o cenário 1, verifica-se que este sofre uma ligeira diminuição, uma vez que, por não possuir fibra de vidro, o material se torna menos perigoso de manusear.

Relativamente ao fator D_{TRL} , é necessária a análise dos materiais constituintes do produto quanto ao seu nível de maturidade tecnológica de reciclagem, sendo constatado que o cenário base possui um valor ligeiramente mais baixo quando comparado ao cenário 1. Isto deve-se ao facto de ter sido atribuído ao R_i da matéria-prima sem adição de fibra de vidro e também às molas de aço o valor 9, uma vez que a tecnologia disponível para reciclar este tipo de materiais se encontra bem maturada e a ser implementada em contexto real. Já para a matéria-prima com adição de fibra de vidro, foi atribuído um R_i de 8, pelo facto de existir tecnologia de reciclagem capaz de reciclar material reforçado com fibra, no entanto, esta não estar suficientemente desenvolvida e maturada.

Deste modo, tornou-se relevante contactar a empresa de gestão de resíduos que efetua a recolha de material não conforme da Fehst, para a posterior reciclagem. Nesse sentido, foi questionado acerca da possibilidade de reciclagem do produto incluindo a soldadura de um componente reforçado com fibra de vidro. No entanto, foi constatado que a empresa apenas recicla produtos em que os seus componentes sejam fabricados a partir das mesmas matérias-primas, pelo que, devido à soldadura de todos os componentes, não é possível a separação dos mesmos para a sua reciclagem individual. Desta forma, o cenário 1 seria o mais indicado para a reciclagem do produto, caso a empresa pretenda manter a soldadura do mesmo.

5.2.3. Índice de Circularidade do Material (MCI)

Para o cálculo do índice de circularidade do material é necessário explorar alguns cenários de forma a ser possível identificar as principais fontes de variação e entender como diferentes fatores afetam o desempenho do indicador. Nomeadamente, a utilização de materiais reciclados, a implementação de sistemas de reutilização ou a redução do uso de materiais virgens. Estes cenários tornam-se importantes para identificar oportunidades de melhoria nos processos de produção e nas cadeias de abastecimento. Por exemplo, podem ser identificadas áreas onde a reciclagem pode ser melhorada, a eficiência do uso de materiais pode ser aumentada ou onde a implementação de sistemas de reutilização pode ser mais efetiva. Neste caso, pelo facto de o produto se encontrar ainda em desenvolvimento, é possível elaborar diversos cenários de forma a facilitar na compreensão e elaboração de estratégias a aplicar para a melhoria da circularidade do produto.

Estes cenários foram propostos à equipa de desenvolvimento da empresa parceira de forma a demonstrar que determinadas medidas, tais como o aumento de incorporação de material reciclado ou a existência de um sistema de recolha *take-back*, podem melhorar a circularidade do material. Neste exercício são apresentados 6 cenários distintos, que se descrevem de seguida.

O cenário base corresponde ao cenário atual, onde são considerados os dados atuais do produto em estudo. De notar que, apenas o fator E_c não foi determinado, visto neste momento não ser expectável que o produto em questão seja reciclado em fim de vida, pelo que não é possível determinar a eficiência desse processo.

O cenário 1 procura a incineração de 50% das peças em fim de vida, mantendo a incorporação de 20% de material reciclado. Para o cenário 2 foi aumentada a percentagem de material reciclado no produto, sendo este totalmente incinerado. O cenário 3 foi elaborado com o intuito de estudar a incineração de 50% do produto e o restante ser encaminhado para reciclagem. Assim, surge a necessidade de elaborar o cenário 4, que procura verificar a diferença existente entre a recolha da totalidade das peças para incineração ou para reciclagem.

Para que seja atingida a circularidade deste produto, é necessário que 100% do material incorporado no mesmo seja proveniente de fontes renováveis, seja material reciclado ou biodegradável. Para tal, foi desenvolvido o cenário 5, que representa um cenário hipotético do que seria necessário para atingir um produto totalmente circular.

O cenário 6 procura também a implementação de um sistema de recolha de produtos (*take-back*), com o intuito de remanufatura dos produtos recolhidos com uma eficiência de 50%. Este cenário supõe que o produto incorpora 50% de material reciclado e 50% de material reutilizado, e que este seja

passível de reciclagem e reutilização, criando um ciclo de *take-back*. De notar que, o objetivo deste tipo de sistema é reduzir o impacto ambiental dos produtos e incentivar a economia circular, em que os materiais são utilizados de forma mais eficiente e sustentável. Atualmente, peças como o produto em estudo são depositadas em aterro, contudo, o setor automóvel é cada vez mais alvo de legislação que obriga à recuperação de determinados componentes. É sabido que os componentes mais fáceis de retirar são chaparias e componentes externos, mas para os componentes plásticos é também conceptualmente possível a sua remoção e desmontagem, e o posterior envio de volta à empresa. Isto, caso estes produtos sejam devidamente planeados, mais uma vez, respeitando os princípios do design circular, para que a sua remoção do veículo e a posterior reciclagem, remanufatura ou recondicionamento, sejam possíveis.

Na Tabela 22 encontram-se compilados os dados necessários ao cálculo do indicador MCI, para os diferentes cenários.

Tabela 22. Dados utilizados no cálculo do indicador MCI

	Cenário base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
M	525.3 g	525.3 g	525.3 g	525.3 g	525.3 g	525.3 g	525.3 g
F_R	20%	20%	25%	25%	25%	50%	50%
F_U	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%
F_S	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%
C_R	0%	0%	0%	50%	100%	50%	50%
C_U	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%
C_C	0%	0%	0%	0%	0%	50%	0%
C_E	0%	50%	100%	50%	0%	0%	0%
E_F	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
E_C	0%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
L	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos
L_{av}	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos	10 anos
U/U_{av}	1	1	1	1	1	1	1

Na Tabela 23 estão representados os valores obtidos nos cálculos intermédios, bem como o resultado do indicador MCI para os diferentes cenários, recorrendo às equações mencionadas no capítulo anterior.

Tabela 23. Valores obtidos nos cálculos intermédios

	Cenário base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
V	0.420	0.420	0.394	0.394	0.394	0	0
W_0	0.525	0.263	0	0	0	0	0
W_F	0	0	0	0	0	0.014	0.014
W_C	0	0	0	0.013	0.026	0.013	0.013
W	0.528	0.265	0.003	0.010	0.017	0.013	0.013
LFI	0.898	0.648	0.37	0.38	0.38	0	0
x	1	1	1	1	1	1	1
$F(x)$	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
MCI	0.192	0.417	0.660	0.660	0.660	1	1

Analisando o cenário base, verifica-se que este possui um MCI bastante baixo, tendo sido obtido um valor de 0.192. Este resultado deve-se ao facto de o fluxo de materiais do produto ser, de momento, linear, por nenhum dos componentes presentes no produto possuir material proveniente de fontes reutilizáveis ou de fontes biológicas, não sendo também recolhidos para reciclagem, compostagem ou recuperação de energia no final do seu uso.

Para o cenário 1, verificou-se que o resultado do indicador MCI aumentou para aproximadamente o dobro, com a incineração do produto em fim de vida. Com a elaboração do cenário 2, ou seja, com o aumento de incorporação de material reciclado e da percentagem de material passível de incineração, verifica-se que existe também uma melhoria substancial do indicador. Contudo, constata-se que qualquer alteração realizada nos parâmetros do indicador para os cenários 2 a 4 não se revela benéfica para o resultado do indicador, tendo sido obtidos resultados semelhantes para cada um dos mesmos. Assim, significa que ao invés da deposição em aterro dos materiais poliméricos, se estes forem destinados a uma destas vias, irá resultar numa mudança significativa do indicador.

Para os cenários 5 e 6 foi obtido o resultado máximo para o indicador, com o aumento da percentagem de material reciclado e reutilizado. Isto significa que a recolha e recuperação de peças para reintrodução no ciclo, é de elevada importância para que este indicador de circularidade seja maximizado.

5.2.4. Diretrizes do Design Circular (CDG)

A seleção deste indicador para o produto em desenvolvimento, surge do facto de este avaliar e identificar as diretrizes que permitem a melhoria do design do produto numa perspetiva de economia circular. A partir de um conhecimento prévio acerca da fase de desenvolvimento do produto em estudo, é possível atribuir uma margem de melhoria baseada no cumprimento ou incumprimento destas diretrizes de design circular e a sua relevância.

Na Figura 31, o diagrama radar representa estes grupos de diretrizes, bem como a relevância da sua melhoria. No Anexo 10 pode ser consultado o método de cálculo do indicador CDG para cada um dos grupos de diretrizes do design circular.

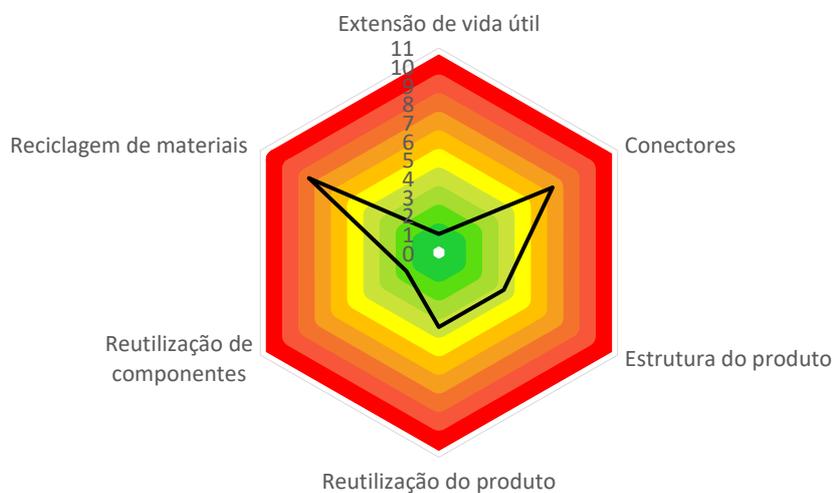


Figura 31. Diagrama radar do indicador CDG

Como se pode verificar, o grupo de diretrizes que menos necessita de melhoria trata-se da extensão de vida útil e reutilização de componentes. Associadas a uma necessidade moderada de melhoria, encontram-se diretrizes relacionadas com a reutilização do produto e a sua estrutura. Por outro lado, é de extrema relevância melhorar o tipo de conetores/uniões utilizados no produto, bem como a reciclagem de materiais presentes no mesmo.

Relativamente ao tipo de união entre os componentes do produto, as melhorias necessárias situam-se ao nível da necessidade de introduzir sistemas de ligação de fácil desmontagem ao invés de ligações fixas, como é o caso da soldadura entre componentes. No que se refere à reciclagem de materiais, as ações de melhoria deveriam recair sobre a uniformização de matérias-primas em componentes unidos por soldadura, o uso de materiais compatíveis entre si, para que sejam facilmente reciclados em conjunto sem necessitar de desmontagem e o uso de materiais de baixo impacto ambiental.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1. Comparação dos casos de estudo

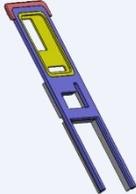
A primeira grande divergência entre os casos de estudo 1 e 2, reside no facto de o primeiro se tratar de um produto já industrializado e em produção em série na empresa, enquanto que o segundo se encontra ainda em fase de desenvolvimento. Tal como referido anteriormente, este ponto revela-se ser a questão mais importante ao longo do trabalho, uma vez que a abordagem destes dois produtos em fases distintas, permite uma perspetiva do que pode ser realmente favorável à circularidade dos mesmos.

Outra das diferenças entre os produtos refere-se à sua composição e ao tipo de montagem dos seus componentes. O primeiro caso de estudo constitui um produto com uma percentagem reduzida de material reciclado relativamente ao segundo, que incorpora uma percentagem substancialmente maior. Ainda acerca dos materiais constituintes do produto, pode aferir-se que os dois produtos são considerados multimaterial, contudo, com diferenças substanciais que podem implicar ou não a inviabilização da reciclagem dos mesmos. No que se refere ao primeiro caso de estudo, o facto de o mesmo conter borracha TPS na sua constituição não inviabiliza a reciclagem do mesmo, pela percentagem usada ser considerada residual. Pelo contrário, para o caso de estudo 2, o facto de um dos componentes incorporar material reforçado com fibra de vidro e o mesmo ser soldado aos restantes componentes traduz-se na imediata inviabilização da reciclagem deste produto, uma vez que as empresas recicladoras não possuem os meios suficientemente maturados para reciclar este tipo de materiais.

Apesar do caso de estudo 1 ser passível de reciclagem tendo em conta a sua constituição, o facto de o mesmo sofrer a montagem dos insertos metálicos revela-se um impasse para a sua reciclagem, uma vez que a empresa recicladora é incapaz de reciclar este tipo de materiais.

Todas as distinções enumeradas anteriormente, bem como os resultados dos indicadores calculados em comum para os dois produtos, foram agrupados na Tabela 24. Estas divergências revelaram ser significativas no que toca ao resultado dos indicadores, tendo sido elaborada uma comparação entre os mesmos.

Tabela 24. Comparação dos casos de estudo 1 e 2

		Caso de estudo 1		Caso de estudo 2	
Caraterísticas do produto					
		<ul style="list-style-type: none"> • Em produção; • 6% material reciclado; • Multimaterial (PC/ABS+TPS); • Multicomponente c/insertos metálicos; 		<ul style="list-style-type: none"> • Em desenvolvimento; • 20% material reciclado; • Multimaterial (PC/ABS, ABS, PC/ABS+10% FV); • Soldadura de componentes. 	
	RDI	D_s	0.98	D_s	0.87
		D_{MSI}	0.49	D_{MSI}	0.55
		D_{TRL}	0.99	D_{TRL}	0.98
		2.46		2.40	
	MRS	0%		7%	
	MCI	0.13		0.19	

Através da Tabela 24 pode concluir-se que, segundo o indicador RDI, é mais desejável reciclar o produto do caso de estudo 1. Isto pode ser explicado pelas diferenças na tipologia de matérias-primas utilizadas e a separação das mesmas. Relativamente ao caso de estudo 1, apesar de o produto ser considerado multimaterial, o mesmo pode ser reciclado, uma vez que a percentagem de TPS incorporada é residual. Já o produto do caso de estudo 2, o facto de conter material reforçado com fibra de vidro na sua composição, revela ser um fator negativo para o indicador, pela sua tecnologia de reciclagem estar menos desenvolvida e pela perigosidade dos materiais constituintes.

Verifica-se desta forma que, relativamente ao fator (D_s), a simplicidade de separação dos materiais é superior para o caso de estudo 1, uma vez que o mesmo não possui qualquer tipo de soldadura entre materiais, contrariamente ao caso de estudo 2. Pode também aferir-se que em termos de segurança do material (D_{MSI}), é mais seguro o manuseamento do produto do caso de estudo 1. Relativamente ao fator (D_{TRL}), verifica-se que os dois produtos possuem valores relativamente

semelhantes, pelo facto de os dois possuírem tecnologias de reciclagem menos desenvolvidas, que não se praticam atualmente a nível nacional.

No que diz respeito a este indicador, foram elaborados cenários para os dois casos de estudo. Para o primeiro caso de estudo, foi calculado o indicador para a peça pintada e não pintada, a fim de analisar qual destas seria mais desejável para reciclagem. Em termos de resultados, foi verificado que os valores se encontram relativamente próximos para a peça injetada e pintada. Isto pode ser explicado pelo facto da percentagem de tinta utilizada ser pouco significativa, tendo, portanto, pouca influência relativamente à desejabilidade do produto. Desta forma, para este produto, foi possível comprovar que, sendo executada a remoção das suas molas metálicas, o mesmo poderia ser facilmente reciclado, sendo este pintado ou não.

Para o segundo caso de estudo, foi verificado o impacto da adição de fibra de vidro ao produto, elaborando um cenário com o produto contendo 0% e 10% de fibra de vidro. Como seria expectável, o resultado para estes cenários revela que é mais desejável reciclar um produto sem presença de fibra de vidro na sua constituição, pelos motivos enunciados anteriormente.

Assim, ambos os casos de estudo, permitem reforçar a importância da existência de um sistema de reciclagem bem desenvolvido, que possua meios capazes de reciclar todos os tipos de materiais.

No que diz respeito ao indicador MRS, verifica-se que a percentagem de material reciclado é, neste caso, o fator determinante para o resultado do indicador. Ambos os casos de estudo estão situados no nível básico de circularidade, o primeiro pelo facto de não ser possível reciclar, não conter material biodegradável ou rapidamente renovável e a percentagem de conteúdo reciclado no produto ser nula. O segundo, pelo facto de a soldadura de material reforçado com fibra de vidro não ser compatível com a reciclagem e, portanto, não ser possível recuperar o material em fim de vida. Desta forma, o caso de estudo 2 revela ser ligeiramente mais circular, por possuir 20% de material reciclado na sua constituição, no entanto, este resultado não se reflete numa subida de nível do indicador relativamente ao caso de estudo 1.

Relativamente a este indicador foram elaborados diversos cenários, variando percentagens de material reciclado, reciclável, biodegradável e rapidamente renovável. No que diz respeito ao caso de estudo 1, foi estudada a possibilidade de reciclar o produto na sua totalidade, sendo para tal necessário um sistema capaz de remover as molas metálicas do produto. A existência deste sistema permitiria ao produto aumentar a sua circularidade em relação ao cenário base, transitando do nível básico para o nível ouro, de acordo com o indicador. Já para o caso de estudo 2, a opção mais viável e vantajosa em termos de circularidade revela ser a não incorporação de fibra de vidro no componente ou a utilização

de outro método de fixação do componente ao invés da soldadura, permitindo que o produto seja reciclado na sua totalidade.

Tal como para o indicador MRS, também no indicador MCI, a incorporação de reciclado revela ser extremamente importante para o resultado do mesmo. Novamente, ambos os produtos são pouco circulares, de acordo com os resultados obtidos no indicador. No entanto, o caso de estudo 2 revela um resultado mais satisfatório pelo facto de incorporar maior percentagem de material reciclado.

Igualmente para o indicador MCI foram estudados e avaliados alguns cenários de forma a aumentar a circularidade do produto, tendo em conta a possibilidade de alteração do produto consoante a fase em que se encontra: produção ou desenvolvimento. Para o caso de estudo 1, pelo mesmo se encontrar industrializado e, portanto, com todos os seus processos definidos e sustentados, é apenas possível sugerir alterações que possam ser implementadas em fases como a fase de produção ou fim de vida. Desta forma, foram sugeridas alterações ao nível da percentagem de material reciclado do produto, a existência de um sistema take-back ou a eficiência da tecnologia de reciclagem deste produto.

Já para o caso de estudo 2, são sugeridos vários cenários, de forma a testar como algumas modificações num produto em desenvolvimento podem ser determinantes para a circularidade do mesmo. Estas alterações situam-se ao nível do aumento da percentagem de material reciclado no produto, a quantidade de material encaminhado para incineração, como também de material recolhido para compostagem ou reutilização.

Após a comparação entre os dois casos de estudo, é possível concluir que, os grandes entraves que se verificam para os dois casos de estudo situam-se ao nível das matérias-primas utilizadas e ao método de montagem dos componentes. Como referido anteriormente, o caso de estudo 1, apesar de se tratar de um produto com as características ideais para a reciclagem, o facto de as suas molas metálicas não serem removidas em fim de vida, impossibilita a sua reciclagem. Caso contrário, supondo a utilização de um equipamento que permitisse a remoção das molas deste produto, o mesmo poderia ser reciclado, evitando a deposição do mesmo em aterro.

Igualmente para o caso de estudo 2, a existência de um componente soldado reforçado com fibra de vidro impossibilita a reciclagem do mesmo. Este entrave poderia ser evitado caso este componente não fosse soldado, sendo utilizado outro tipo de fixação.

Contudo, no que diz respeito às limitações dos casos de estudo, conclui-se que numa peça que se encontre em desenvolvimento, é possível sugerir modificações que possam dar à empresa informações do que é ou não possível implementar, contrariamente ao produto que se encontra em produção, em que nenhum desses fatores podem ser alterados. Desta forma, realizar este estudo em

fases posteriores ao desenvolvimento do produto apenas permitirá uma caracterização do mesmo, não promovendo a sua alteração. Pelo que, quanto mais cedo for avaliada esta temática, mas facilmente são detetadas possíveis falhas no produto, garantindo a melhoria do seu desempenho no que diz respeito à sua sustentabilidade.

Desta forma, no próximo subcapítulo será apresentada uma abordagem para o desenvolvimento de um produto mais sustentável, fazendo o ajuste a alguns dos procedimentos utilizados de momento na empresa.

6.2. Metodologia para desenvolvimento de um produto com aplicação de indicadores de circularidade

Durante a execução do trabalho foi efetuada uma tentativa de ajuste e redesenho do ciclo do processo de desenvolvimento de produto. Assim, para além dos *inputs* já existentes, como os requisitos funcionais, as especificações técnicas ou resultados de testes, foram também considerados aspetos de circularidade e sustentabilidade. Para tal, foi acompanhado o desenvolvimento de um produto informado por indicadores de circularidade, com o intuito de verificar de que forma poderiam ser reajustados certos procedimentos já estabelecidos pela equipa de desenvolvimento para a obtenção de um produto mais circular.

De forma a resumir o método aplicado para o desenvolvimento de um produto mais sustentável, foi elaborado um fluxograma (Figura 32) que retrata o procedimento utilizado consoante as diferentes fases de um projeto em desenvolvimento na empresa. Este esquema simboliza a importância e o quão frequente deverá ser a interatividade entre um membro da equipa de sustentabilidade e a equipa de desenvolvimento do produto.

Como se pode verificar, na fase de desenvolvimento do conceito foi executado o levantamento de características relevantes acerca do produto, tais como a sua funcionalidade, os requisitos estipulados pelo cliente, etc. Este levantamento permitiu identificar os pontos mais críticos do produto aos quais foram, posteriormente, propostas alterações e melhorias.

Relativamente à fase de design preliminar, uma vez que decorre a definição do design do produto e o desenho preliminar dos seus componentes mais importantes, são indicados os guias que promovem a diferença na circularidade do produto. Estes passam pela sugestão de caminhos como a uniformização das matérias-primas, a incorporação de maior quantidade de material reciclado, bem como alternativas mais sustentáveis para a montagem e acabamento do produto.

Após a sugestão destas alternativas, são estudados diferentes cenários para as mesmas, através da utilização de indicadores de circularidade mais pertinentes para o produto. Desta forma, é demonstrada a melhoria da circularidade do produto quando realizadas determinadas alterações no mesmo, seja através da seleção mais cuidada das suas matérias-primas, como pelas técnicas de acabamento utilizadas ou a tecnologia de reciclagem disponível. Esta última fase ajuda a afinar e comprovar através de cálculos as fases anteriores. Numa fase posterior, nomeadamente na fase de produção piloto, poderão ser atualizados os indicadores conforme as alterações que tenham sido executadas e fornecer o resultado da circularidade final do produto.

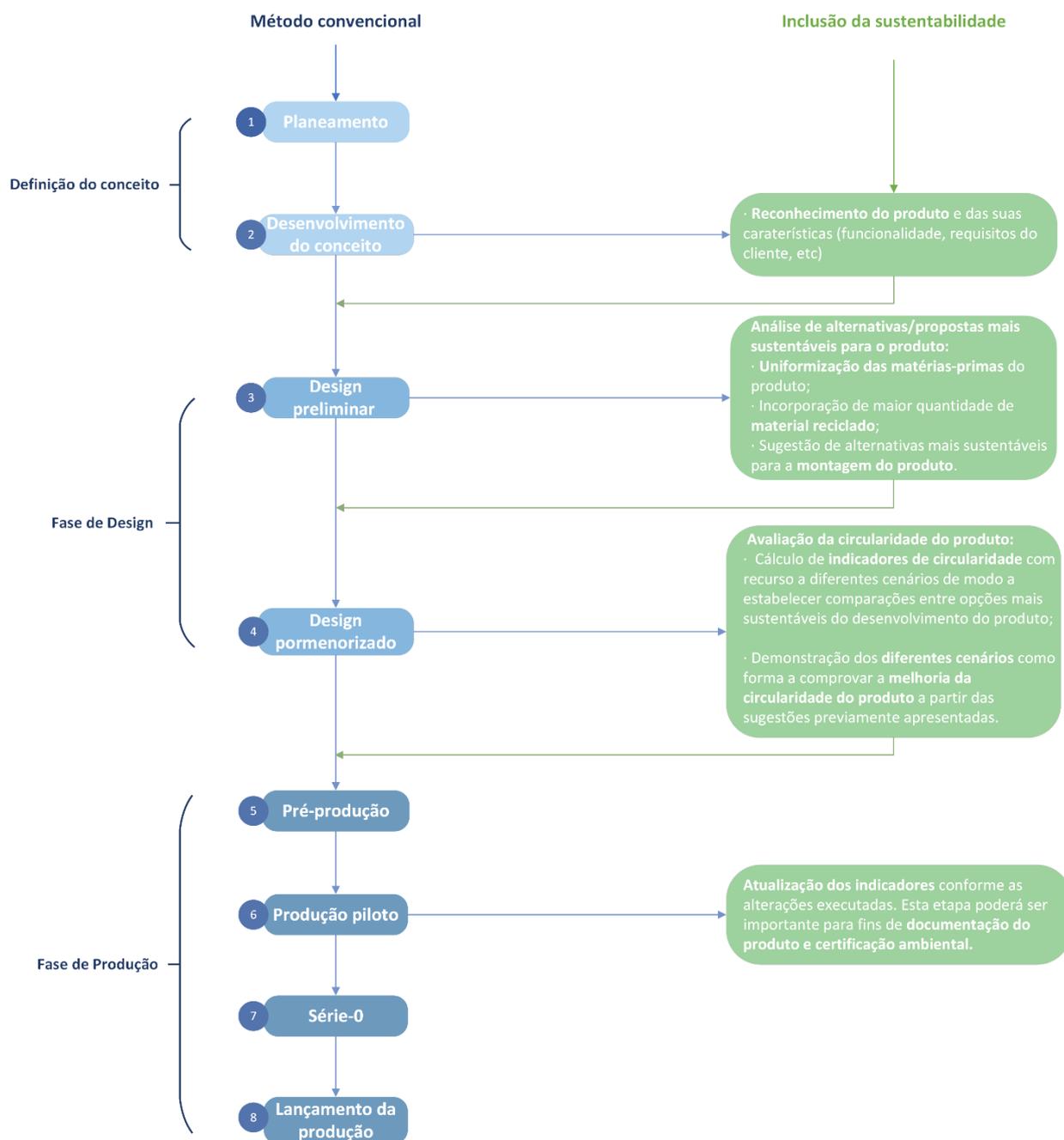


Figura 32. Metodologia utilizada para a inclusão da sustentabilidade no desenvolvimento do produto

Caso a metodologia representada na Figura 32 seja aplicada a outro tipo de produtos e estes sejam de uma elevada diferença de complexidade do mesmo, o número de etapas para o desenvolvimento do produto poderá variar e, portanto, existirão etapas em que poderá ou não, ser introduzida a metodologia proposta. Desta forma, a metodologia terá de ser adaptada e ajustada para o momento mais oportuno dessa intervenção. No entanto, é também possível verificar que esta intervenção

é particularmente útil na fase de design, onde poderão ser sugeridos este tipo de *inputs* antes de dar início à produção.

Assim, conclui-se que deveriam ser reajustados e revistos os procedimentos internos da empresa, de maneira a incluir a temática da sustentabilidade no desenvolvimento de novos produtos. Como sugestão, poderiam ser incluídos membros especializados em ambiente e sustentabilidade para assim ser desenvolvido um processo multidisciplinar e não apenas da equipa de desenvolvimento. Desta forma, poderiam ser dados *inputs* que pudessem fazer a diferença na sustentabilidade do produto, tornando assim a empresa diferenciadora e competitiva no mercado.

7. CONCLUSÕES

O principal objetivo da presente dissertação foi, de um modo geral, a sensibilização da empresa parceira para a análise mais aprofundada de questões relacionadas com a sustentabilidade, de modo a tornar a mesma uma empresa mais consciente da temática ambiental e fornecedora de produtos cada vez mais circulares. Para tal, o trabalho realizado consistiu no acompanhamento do desenvolvimento de um produto da empresa apoiado por indicadores de circularidade, com o intuito de verificar de que modo são passíveis alterações no produto, num estágio ainda precoce do seu desenvolvimento. De forma a estabelecer a comparação em termos de possibilidade de alteração dos produtos, foi comparado um produto em desenvolvimento com um outro em produção em série na empresa.

Para ambos os casos de estudo, os resultados obtidos com o cálculo dos indicadores mencionados permitiram verificar a obtenção de valores satisfatórios nos indicadores RDI e VRE, contudo os resultados dos restantes indicadores apresentaram um cenário mais desanimador, como é o caso do indicador MRS, MCI, CEIP e CDG. No caso do indicador MRS foram obtidos resultados de 0% e 7% e para o MCI de 0.13 e 0.19 para os casos de estudo 1 e 2, respetivamente. Isto pode ser explicado pelo facto do indicador MRS considerar apenas o material utilizado no produto, sendo que ambos contêm baixa percentagem de material reciclado e não são passíveis de reciclagem.

Relativamente ao indicador MCI, este apresenta uma abordagem mais completa, ou seja, engloba as diferentes fases atravessadas durante o ciclo de vida do produto, e, portanto, é capaz de avaliar uma gama mais ampla de possíveis ações que possam ser executadas de modo a aumentar a circularidade dos produtos. Desta forma, é possível concluir que a incorporação de material reciclado num produto em nada é benéfica para a circularidade se não for possível de recuperar o mesmo em fim de vida.

Para o indicador RDI, considerando os materiais utilizados e a tecnologia existente para os tratar, são obtidos valores relativamente elevados no que toca à necessidade de reciclagem destes produtos, o que permite reforçar a importância da existência de um sistema de reciclagem bem desenvolvido. Relativamente à avaliação do indicador CEIP e CDG, é possível concluir que os mesmos acarretam diversas vantagens à abordagem das fases constituintes do ciclo de vida de um produto, como a facilidade e a rapidez de deteção de possíveis melhorias no produto no que toca à sua circularidade, em cada uma destas fases.

De um modo geral, no que toca ao primeiro caso de estudo (produto industrializado), a partir

dos cenários propostos foi possível constatar que existem muitas limitações em termos de alterações que possam ser executadas ao produto nesta fase, contrariamente ao segundo caso de estudo em que foi possível a proposta de cenários mais abrangentes do seu ciclo de vida.

Assim, os cenários elaborados permitiram verificar que determinadas modificações poderiam ser impulsionadoras de melhoria da circularidade, tendo sido constatado que os possíveis fatores de melhoria seriam focados em aspetos como a eliminação da fibra de vidro ou evitar o uso de soldadura quando se trata de um componente reforçado com este tipo de material. Desta forma, com a execução deste trabalho, pode afirmar-se que o facto de incluir a sustentabilidade numa fase mais precoce do projeto permite um espectro mais abrangente de modificações que poderão ser determinantes para a circularidade do produto.

Constata-se, assim, que a inclusão da circularidade e do pensamento circular dos produtos em etapas de iniciais do desenvolvimento dos mesmos, poderá ser um fator que privilegia e distingue as empresas que a possuam. Para tal, foi estabelecida uma metodologia de inclusão da sustentabilidade no desenvolvimento do produto, que enfatiza a importância e a frequência da interatividade entre um membro de sustentabilidade e a equipa de desenvolvimento do produto. Este membro poderá assim fazer uma avaliação ao produto durante a sua fase de desenvolvimento, e sugerir alternativas mais circulares para o mesmo. Esta metodologia poderá ter por base o cálculo dos indicadores de circularidade, para avaliar em que patamar se encontra o produto na direção da economia circular. Desta forma, torna-se útil que o mesmo possua uma ferramenta/software que permita o cálculo de cada um dos indicadores de circularidade e que este seja adaptável a qualquer tipo de produto.

Acrescenta-se também que, certas decisões que têm vindo a ser tomadas ao longo do tempo na indústria automóvel, têm dificultado a circularidade dos produtos, ao invés de a melhorar. Geralmente, acabam por não ser considerados aspetos importantes como a inclusão de medidas circulares para os produtos, muitas das vezes pelo facto de envolverem maiores custos, pela falta de conscientização acerca dos benefícios da economia circular e a falta de incentivos económicos para a adoção de práticas mais circulares. Apesar de todas as opções propostas ao longo do trabalho, o desfecho da maioria dos plásticos contidos num automóvel no seu fim de vida, continua a ser o aterro. Desta forma, mesmo com todos os esforços concentrados nesta problemática, desenvolvendo diferentes meios para aumentar a circularidade dos produtos, a economia circular enfrenta desafios significativos, especialmente quando se trata da conscientização cívica para tal. Assim, torna-se importante mudar mentalidades, implementar políticas e regulamentações que incentivem à adoção de uma economia mais circular, a partir, por exemplo, da reciclagem de componentes e materiais e a inovação do design dos mesmos.

Em síntese, verifica-se que a elaboração do trabalho deu aso a, de certa forma, estabelecer uma ligação, não muito usual, entre o departamento ambiental e o departamento de desenvolvimento, sendo bastante promissor em termos do futuro da sustentabilidade da empresa. Ao longo da dissertação foi explorada a importância da sustentabilidade no desenvolvimento de um produto, sendo evidente que a utilização de indicadores de circularidade permite uma compreensão mais profunda das interações entre os diferentes estágios do ciclo de vida do produto. Desde a fase de design, passando pela seleção de matérias-primas, processos de produção até ao uso e fim de vida, é notório que os indicadores oferecem *insights* importantes e podem orientar a tomada de decisão no sentido de otimizar a eficiência dos recursos e reduzir resíduos. Todas estas questões deverão ser partilhadas e exploradas futuramente com outras equipas de clientes, uma vez que quanto maior a abordagem a esta temática, mais decisores poderão vir a ser influenciados pela mesma.

O cálculo destes indicadores permitiu verificar que existe um elevado potencial de melhoria relativamente aos produtos analisados, sendo este mais evidente para o produto em fase de desenvolvimento. No entanto, conclui-se que por vezes os indicadores não são sensíveis o suficiente para este tipo de indústria onde as especificações técnicas dos produtos são bastante elevadas e exigentes, não permitindo um leque diversificado de recursos que possam ser selecionados.

As possíveis medidas a adotar situam-se ao nível da substituição das matérias-primas por alternativas mais sustentáveis, a eliminação da soldadura entre matérias-primas não compatíveis, a incorporação de matéria-prima reciclada no produto e a existência de tecnologias de reciclagem capazes de reciclar produtos com diferentes especificidades.

Para concluir, existe uma necessidade de mudança de paradigma em relação à indústria automóvel e às indústrias ligadas ao fim de vida dos automóveis, que atuam na desmontagem e separação de materiais. Devem ser criadas mais empresas que se dediquem à reciclagem de materiais de engenharia e reforçada a legislação sobre a obrigatoriedade de incinerar este tipo de materiais, pois têm valor energético. Modificações de matérias primas ou até design do produto são possíveis, no entanto, ao nível de empresas do tipo *Tier II* são dificultadas, portanto, estas empresas, por mais empenhadas que estejam sobre aspetos relacionados com a sustentabilidade, estão limitadas ao que lhes é imposto pelos seus clientes.

Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, são sugeridas as seguintes propostas:

- Implementação da metodologia de desenvolvimento do produto sustentável na empresa;
- Elaboração de uma ferramenta/software que permita o cálculo rápido e adaptável dos indicadores de circularidade a qualquer produto;

- [1] OECD, “Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short.” 2022. (7 de fevereiro de 2023). Retirado de: <https://www.oecd.org/environment/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm>
- [2] Ellen MacArthur Foundation, “Towards a circular economy - Business rationale for an accelerated transition,” 2015. (15 de março de 2023). Retirado de: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economybusiness-rationale-for-an-accelerated-transition>
- [3] C. T. de Oliveira, T. E. T. Dantas and S. R. Soares, “Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 26, pp. 455–468, abr.2021, doi: 10.1016/j.spc.2020.11.024.
- [4] D. G. Bucknall, “Plastics as a materials system in a circular economy: Plastics in the Circular Economy,” *Philosophical Transactions of the Royal Society: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Royal Society Publishing, vol.378, no.2176, jul. 2020. doi: 10.1098/rsta.2019.0268.
- [5] C. Hagn, “Plastics recycling in the automotive industry.”, 2015. (17 de março 2023). Retirado de: <https://www.plasticstoday.com/plastics-recycling-automotive-industry>
- [6] Observador Lab, “Os automóveis são produtos que provocam preocupações sustentáveis?”. 2021. (8 de fevereiro 2023) Retirado de: <https://observador.pt/2021/09/14/as-fabricas-de-automoveis-sao-ambientalmente-sustentaveis/>
- [7] G. Micheline, R. N. Moraes, R. N. Cunha, J. M. H. Costa, and A. R. Ometto, “From Linear to Circular Economy: PSS Conducting the Transition,” *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 2–6, 2017, doi: 10.1016/J.PROCIR.2017.03.012.
- [8] Z. Sverko Grdic, M. Krstinic Nizic and E. Rudan, “Circular Economy Concept in the Context of Economic Development in EU Countries”, *Sustainability*, vol.12, no.3060, 2020, doi: 10.3390/su12073060.
- [9] V. Elia, M. G. Gnoni, and F. Tornese, “Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis,” *J Clean Prod*, vol. 142, pp. 2741–275, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.196.
- [10] BCSD Portugal, “Economia Circular”. 2021. (14 de março de 2023). Retirado de: <https://bcsdportugal.org/economia-circular/>
- [11] Pearce, D., & Turner, R. K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Johns Hopkins University Press. ISBN: 9780801839870
- [12] A. de Pascale, R. Arbolino, K. Szopik-Depczyńska, M. Limosani, and G. Ioppolo, “A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 281, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124942.
- [13] Braungart, M., & McDonough, W. (2009). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things (Patterns of the Planet)*. North Point Press. ISBN: 9780099535478

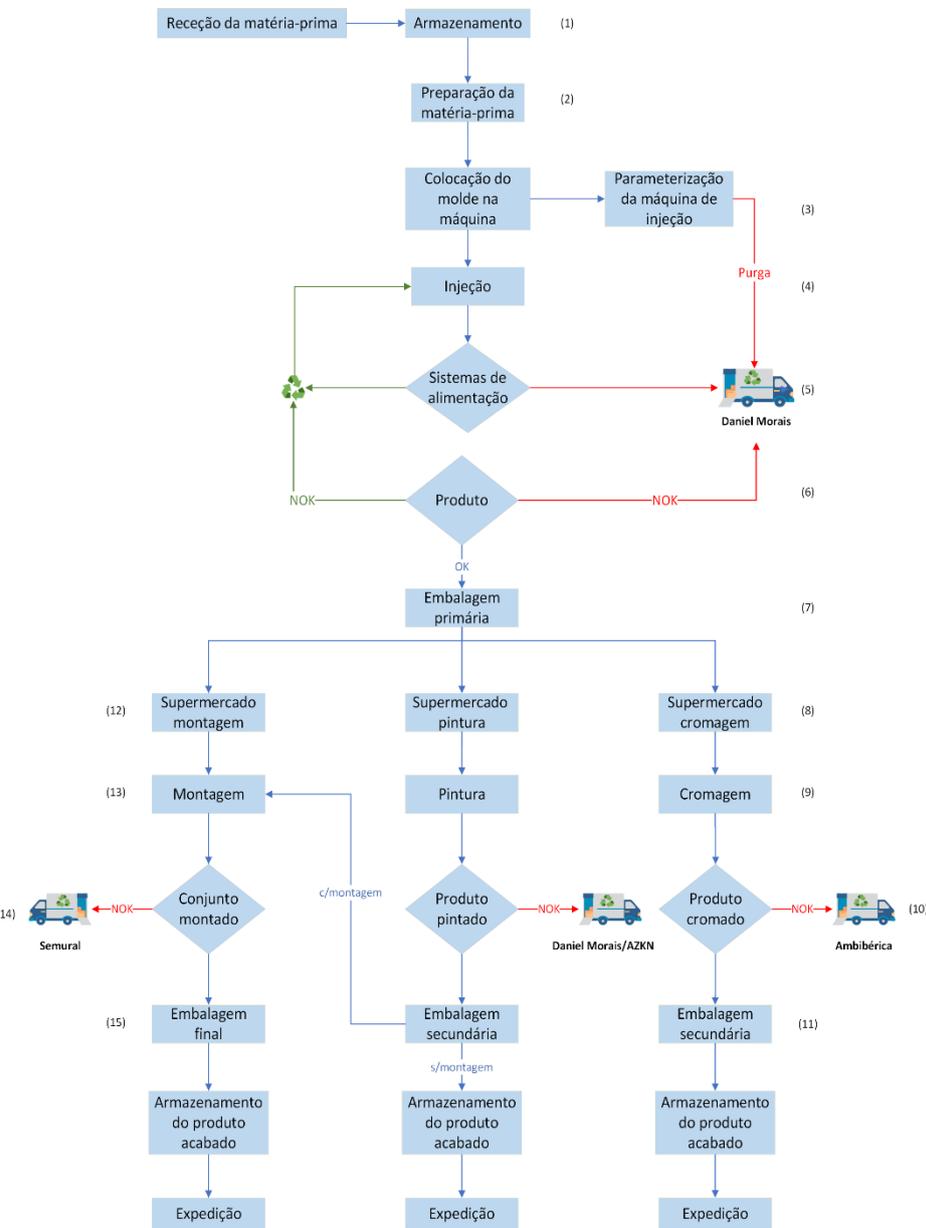
- [14] J. G. Vargas-Hernandes, M. de Jesús, and M. Medrano, "The Circular Economy: Analysis Based on The Theory of Resources and Capabilities" *Gestão e Sustentabilidade*, vol.1, pp. 298-309, 2019, doi: 10.36661/2596-142X.2019v1i1.10902
- [15] M. Calisto Friant, W. J. V. Vermeulen, and R. Salomone, "A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 161, out. 2020. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104917.
- [16] EY-Parthenon, "Indicadores de Economia Circular: Um Contributo para o Sistema Estatístico Nacional". 2020. (15 de fevereiro de 2023). Retirado de: https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/pt_ao/topics/strategy/pdfs/ey-portugal-article-tas-indicadores-de-ec-relatorio-final-2020-04.pdf
- [17] M. A. Franco, "Circular economy at the micro level: A dynamic view of incumbents' struggles and challenges in the textile industry," *Journal of Cleaner Production*, vol. 168, pp. 833–845, dez. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.056.
- [18] B. Mrowiec, "Plastics in the circular economy (CE)," *Ochrona Srodowiska i Zasobow Naturalnych*, vol. 29, no. 4, pp. 16–19, dez. 2018, doi: 10.2478/OSZN-2018-0017.
- [19] World Business Council for Sustainable Development, "Indicadores de transição circular," 2021. 13 janeiro de 2023. Retirado de: https://bcspdportugal.org/wp-content/uploads/2021/03/CTI_2_BCSD_VF-1.pdf
- [20] Ellen MacArthur Foundation, "Economia Circular". (16 de janeiro de 2023). Retirado de: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/conceito>
- [21] European Commission, "Circular economy action plan." 2020. (19 de janeiro de 2023). Retirado de: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
- [22] Compete 2020, "Pacto europeu para os plásticos." 2020. (19 de janeiro de 2023). Retirado de: <https://www.compete2020.gov.pt/noticias/detalhe/PactoEuropeu-Plasticos-NL307-18062021>
- [23] A. Janik and A. Ryszko, "Measuring product material circularity - A case of automotive industry," *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2017, vol.17, no.43, pp. 123–130. doi: 10.5593/sgem2017H/43/S18.016.
- [24] C. Almeida, "Estudo comparativo dos indicadores existentes de Economia Circular com perspectivas à criação de uma ferramenta de monitorização aplicada à realidade nacional portuguesa," 2020. (9 de março de 2022). Retirado de: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/129852/2/427536.pdf>
- [25] C. T. de Oliveira, T. E. T. Dantas, and S. R. Soares, "Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments," *Sustainable Production Consumption*, vol. 26, pp. 455–468, abr. 2021, doi: 10.1016/J.SPC.2020.11.024.
- [26] J. Matos, C. Martins, C. L. Simões, and R. Simões, "Comparative analysis of micro level indicators for evaluating the progress towards a circular economy," *Sustainable Production Consumption*, vol. 39, pp. 521–533, jul. 2023. doi: 10.1016/j.spc.2023.06.002.

- [27] H. S. Kristensen and M. A. Mosgaard, "A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?," *Journal of Cleaner Production*, vol. 243, jan 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118531.
- [28] A. Jerome, H. Helander, M. Ljunggren, and M. Janssen, "Mapping and testing circular economy product-level indicators: A critical review," *Resources Conservation Recycling*, vol. 178, mar. 2022, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2021.106080.
- [29] Volkswagen, "Supplier Guide for Product Development", 2017.
- [30] Munari, Bruno. (1981) - *Das Coisas Nascem as Coisas*. Lisboa. Ed: Presença.
- [31] Bonsiepe, Gui. (1934) - *Teoria e Prática do Design Industrial - Elementos Para um Manual Crítico*. Ed: Centro Português de Design.
- [32] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product design and development*, quinta ed. McGraw-Hill/Irwin, 2012. ISBN: 978-0-07-340477-6
- [33] J. Fiksel, *Design for Environment: A Guide to Sustainable Product Development*, segunda ed. The McGraw-Hill Companies. 2009. ISBN: 9780071605564
- [34] D. Jugend, M. A. P. Pinheiro, J. V. R. Luiz, A. V. Junior, and P. A. Cauchick-Miguel, "Achieving environmental sustainability with ecodesign practices and tools for new product development," *Innovation Strategies in Environmental Science*, 2019, pp. 179–207. doi: 10.1016/B978-0-12-817382-4.00006-X.
- [35] Y. Asiedu, P. Gu, "Product life cycle cost analysis: State of the art review," *International Journal of Production Research*, vol. 36, nov. 2010, no. 4, pp. 883–908, doi: 10.1080/002075498193444.
- [36] H. Kaebernick, S. Kara, and M. Sun, "Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol.19, dez. 2003, pp. 461–468. doi: 10.1016/S0736-5845(03)00056-5.
- [37] A. P. M. Velenturf, P. Purnell, "Principles for a sustainable circular economy," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, pp. 1437–1457, jul. 2021. doi: 10.1016/j.spc.2021.02.018.
- [38] N. M. P. Bocken, I. de Pauw, C. Bakker, and B. van der Grinten, "Product design and business model strategies for a circular economy," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 33, jul. 2016, no.5, pp. 308–320, doi: 10.1080/21681015.2016.1172124.
- [39] J. Mesa, I. Esparragoza, and H. Maury, "Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model," *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, set. 2018 pp. 1429–1442, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.131.
- [40] R. Bradley, I. S. Jawahir, F. Badurdeen, and K. Rouch, "A Framework for Material Selection in Multi-Generational Components: Sustainable Value Creation for a Circular Economy," *Procedia CIRP*, vol.48, 2016, pp. 370–375. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.247.
- [41] WBCSD, "Indicadores de transição circular - Métricas para empresas desenvolvidas por empresas.", 2021. (6 de junho de 2023). Retirado de: https://bcspdportugal.org/wp-content/uploads/2021/03/CTI_2_BCSD_VF.pdf

- [42] M. L. Brusseau, “Sustainable Development and Other Solutions to Pollution and Global Change,” *Environmental and Pollution Science*, 2019, pp. 585–603. doi: 10.1016/b978-0-12-814719-1.00032-x.
- [43] D. Jugend, M. A. P. Pinheiro, J. V. R. Luiz, A. V. Junior, and P. A. Cauchick-Miguel, “Achieving environmental sustainability with ecodesign practices and tools for new product development,” *Innovation Strategies in Environmental Science*, 2019, pp. 179–207. doi: 10.1016/B978-0-12-817382-4.00006-X.
- [44] “Fehst.” 2017. (13 de janeiro de 2023). Retirado de: <https://www.fehstgroup.com/pt/>
- [45] ISO, “ISO 9001:2015 – Quality management”. (21 de junho de 2023). Retirado de: <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>
- [46] SGS, “IATF 16949:2016 – Sistema de gestão da qualidade automóvel.” (21 de junho de 2023). Retirado de: <https://www.sgs.pt/pt-pt/transportation/automotive/manufacturing/audits-and-certification/quality/iatf-16949-2016-automotive-quality-management-system>
- [47] ISO, “ISO 14001:2015 - Environmental management systems – Requirements with guidance for use.” (21 de junho de 2023). Retirado de: <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- [48] Fehst Componentes Lda, “Licença Ambiental”, 2017. (3 de abril de 2023). Retirado de: https://ladigital.apambiente.pt/2.6/FEHST%20Componentes,%20Lda/LA%20665_0.0_2017%20-%20FEHST%20Componentes%20Lda.pdf
- [49] A. Goldschmidt and H-Joachim Streitberger (2003) - Basics of coating technology, terceira ed, Ed: BASF. ISBN:9783866303362
- [50] A. Eqbal and A. kumar Sood, “Metallization on FDM parts using the chemical deposition technique,” *Coatings*, vol. 4, no. 3, pp. 574–586, set. 2014, doi: 10.3390/coatings4030574.
- [51] Heraeus, “Heating and deburring plastics with infrared.” 2023. (12 de abril de 2023). Retirado de: https://www.heraeus.com/en/hng/industries_and_applications/infrared_heat/heating_and_deburring_plastic_with_infrared.html
- [52] Kun-Mo Lee, Haruo Uehara “Asia-Pacific Economic Cooperation Committee on Trade and Investment Best Practices of ISO 14021”, 2003
- [53] Preisgruppe, “Plastics moulded parts - Tolerances and acceptance conditions”. 2013.
- [54] Volkswagen, “Sistemática de pontos de referência VW01055”. 2017.
- [55] Euro NCAP. “Whiplash”. 2023 (22 de maio de 2023). Retirado de: <https://www.euroncap.com/en/vehicle-safety/the-ratings-explained/adult-occupant-protection/rear-impact/whiplash/>
- [56] ISO “Packaging and the environment – Material recycling”. 2013. (18 de maio de 2023). Retirado de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18604:ed-1:v1:en>
- [57] T. I. Poznyak, I. Chairez Oria, and A. S. Poznyak, “Biodegradation,” *Ozonation and Biodegradation in Environmental Engineering*, pp. 353–388, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-812847-3.00023-8.
- [58] Buildings “Regional and Rapidly Renewable Materials.” (18 de maio de 2023). Retirado de: <https://www.buildings.com/feature/article/10192026/regional-and-rapidly-renewable-materials>

- [59] “Cradle to Cradle Certified” Cradle to Cradle Certified Product Standard. (18 de maio de 2023). Retirado de: https://cdn.c2ccertified.org/resources/certification/standard/STD_C2CCertified_ProductStandard_V3.1_030220.pdf
- [60] “Organic recycling – Specifications for compostable plastics”. 2021. (18 de maio 2023). Retirado de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17088:ed-3:v1:en:term:3.2>
- [61] A. A. Mohamed Sultan, E. Lou, and P. T. Mativenga, “What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 154, jun. 2017, pp. 51–60, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.201.
- [62] J. Goddin et al., “Circularity Indicators Methodology.” *Buildings* 2023, vol.13, 1706, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13071706>
- [63] A. Jerome, H. Helander, M. Ljunggren, and M. Janssen, “Mapping and testing circular economy product-level indicators: A critical review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 178, mar. 2022. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106080.
- [64] A. Janik and A. Ryszko, “Towards measuring circularity at product level-methodology and application of material circularity indicator industry” 2017. Retirado de: <https://www.researchgate.net/publication/320779652>
- [65] F. Di Maio, P. C. Rem, K. Baldé, and M. Polder, “Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach,” *Resources Conservation and Recycling*, vol. 122, 2017, pp. 163–171, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.02.009.
- [66] M. D. Bovea and V. Pérez-Belis, “Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment,” *Journal of Environmental Management*, vol. 228, dez. 2018, pp. 483–494, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.014.
- [67] Padmini Pandey and U.V Kiran, “Solvent based paint and it’s impact on environment and human beings environment and society,” out. 2020, pp. 198–207.
- [68] The R. Group, “Circular Economy.” 2021. (17 de maio de 2023). Retirado de: <https://therockgroup.biz/circular-economy-2/>

ANEXO I – Fluxograma dos processos de fabrico na Fehst Componentes



1) Receção da matéria-prima Na receção da matéria-prima são verificadas as fichas técnicas e de segurança do material para garantir que correspondem aos materiais recebidos.
2) Preparação da matéria-prima A matéria-prima é armazenada em estufas de forma a retirar humidade e pré-aquecer o material para o processo de injeção.
3) Preparação do processo de injeção Nesta etapa são colocados o molde na máquina e os seus parâmetros de injeção. O material resultante da purga é embalado, armazenado e identificado como "Aparas de matérias plásticas" com o código LER 120105. Posteriormente, este material é sujeito a tratamento pela empresa recicladora.
4) Injeção
5) Corte automático do jito O jito pode ou não ser reintroduzido no processo de injeção. Para tal, existem granuladores acoplados à injetora, que permitem a granulação desses materiais, e que, subsequentemente, são incorporados novamente no processo. Os jitos que não são incorporados novamente no processo, são identificados com o código LER 120105 e recolhidos pela empresa recicladora.
6) Inspeção visual da peça Após o processo de injeção, as peças são sujeitas a inspeção visual. As peças NOK fabricadas a partir de PC/ABS são encaminhadas para uma empresa exterior que faz a sua trituração para fabricar um produto específico compostos por 100% de material reciclado. As restantes peças NOK são identificadas com o código LER120105 e recolhidas pela entidade recicladora para tratamento.
7) Embalagem primária Embalamento primário consiste em embalar peças que sofreram apenas um processo de transformação (injeção). Estas sofrem embalamento primário, para seguirem para o processo seguinte, neste caso, montagem, pintura ou cromagem.
8) Armazenamento dos produtos no respetivo supermercado Cada produto primário é armazenado no respetivo supermercado, dependendo da sua etapa seguinte.
9) Produtos sofrem processo de acabamento ou montagem Processo de acabamento trata-se da pintura ou montagem
10) Controlo Peças NOK derivadas destes processos são identificadas com o código LER12 no caso de produtos pintados e 13 em produtos cromados.
11) Embalamento secundário No embalamento secundário são embaladas as peças que sofreram 2 processos de transformação. Neste caso, como primeiro processo a injeção e como segundo processo a pintura ou cromagem.
12) Produtos armazenados no supermercado da montagem
13) Montagem
14) Controlo das peças Peças NOK resultantes do processo são separadas e recolhidas pela empresa recicladora.
15) Embalamento terciário Peças sofrem o embalamento após três processos de transformação (injeção, pintura e montagem).
16) Armazenamento do produto final
17) Expedição

Figura 33. Fluxograma dos processos de fabrico na Fehst Componentes

ANEXO II – Painel de instrumentos



Figura 34. Localização do computador de bordo e *airvent* no painel de instrumentos

ANEXO III - Fluxograma do caso de estudo 1

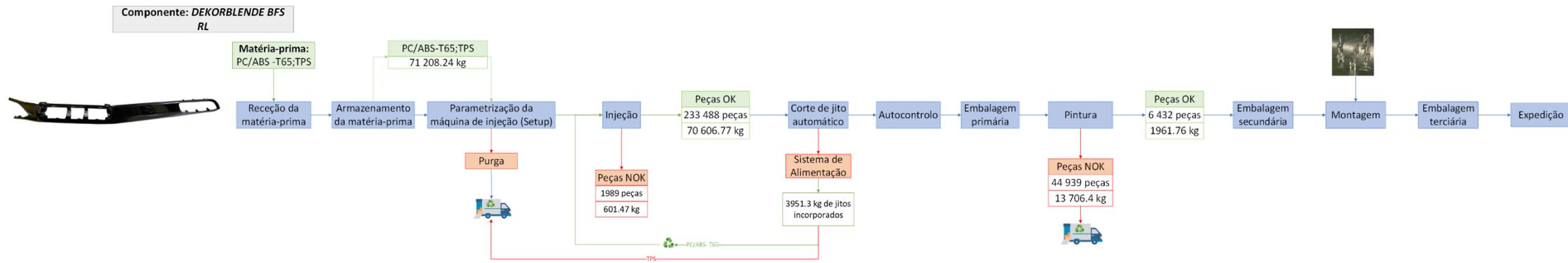


Figura 35. Fluxograma do caso de estudo 1

ANEXO IV - Tabela de tolerâncias dimensionais para peças plásticas

Table 2 — Plastic moulded part tolerances as symmetrical limit dimensions for sizes

Dimensions in millimetres

Tolerance group	Limit dimensions (GA) for nominal size ranges																
	1 to 3	> 3 to 6	> 6 to 10	> 10 to 18	> 18 to 30	> 30 to 50	> 50 to 80	> 80 to 120	> 120 to 180	> 180 to 250	> 250 to 315	> 315 to 400	> 400 to 500	> 500 to 630	> 630 to 800	> 800 to 1000	
TG1	W	± 0,007	± 0,012	± 0,018	± 0,022	± 0,026	± 0,031	± 0,037	± 0,044	–	–	–	–	–	–	–	
	NW	± 0,012	± 0,018	± 0,022	± 0,026	± 0,031	± 0,037	± 0,044	± 0,050	–	–	–	–	–	–	–	
TG2	W	± 0,013	± 0,020	± 0,029	± 0,035	± 0,042	± 0,050	± 0,060	± 0,090	± 0,13	± 0,15	± 0,16	± 0,18	± 0,20	–	–	
	NW	± 0,020	± 0,029	± 0,035	± 0,042	± 0,050	± 0,060	± 0,090	± 0,13	± 0,15	± 0,16	± 0,18	± 0,20	± 0,22	–	–	
TG3	W	± 0,020	± 0,031	± 0,05	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,15	± 0,20	± 0,23	± 0,26	± 0,29	± 0,40	± 0,55	± 0,63	± 0,70
	NW	± 0,031	± 0,050	± 0,06	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,15	± 0,20	± 0,23	± 0,26	± 0,29	± 0,40	± 0,55	± 0,63	± 0,70	± 0,77
TG4	W	± 0,03	± 0,05	± 0,08	± 0,09	± 0,11	± 0,13	± 0,15	± 0,23	± 0,32	± 0,35	± 0,41	± 0,45	± 0,63	± 0,88	± 1,00	± 1,15
	NW	± 0,05	± 0,08	± 0,09	± 0,11	± 0,13	± 0,15	± 0,23	± 0,32	± 0,35	± 0,41	± 0,45	± 0,63	± 0,88	± 1,00	± 1,15	± 1,30
TG5	W	± 0,05	± 0,08	± 0,11	± 0,14	± 0,17	± 0,20	± 0,23	± 0,36	± 0,50	± 0,58	± 0,65	± 0,70	± 1,00	± 1,40	± 1,60	± 1,80
	NW	± 0,08	± 0,11	± 0,14	± 0,17	± 0,20	± 0,23	± 0,36	± 0,50	± 0,58	± 0,65	± 0,70	± 1,00	± 1,40	± 1,60	± 1,80	± 2,10
TG6	W	± 0,07	± 0,12	± 0,18	± 0,22	± 0,26	± 0,31	± 0,37	± 0,57	± 0,80	± 0,93	± 1,05	± 1,15	± 1,60	± 2,20	± 2,50	± 2,80
	NW	± 0,12	± 0,18	± 0,22	± 0,26	± 0,31	± 0,37	± 0,57	± 0,80	± 0,93	± 1,05	± 1,15	± 1,60	± 2,20	± 2,50	± 2,80	± 3,10
TG7	W	± 0,13	± 0,20	± 0,29	± 0,35	± 0,42	± 0,50	± 0,60	± 0,90	± 1,25	± 1,45	± 1,60	± 1,80	± 2,60	± 3,50	± 4,00	± 4,50
	NW	± 0,20	± 0,29	± 0,35	± 0,42	± 0,50	± 0,60	± 0,90	± 1,25	± 1,45	± 1,60	± 1,80	± 2,60	± 3,50	± 4,00	± 4,50	± 5,00
TG8	W	± 0,20	± 0,31	± 0,45	± 0,55	± 0,65	± 0,80	± 0,95	± 1,40	± 2,00	± 2,30	± 2,60	± 2,85	± 4,00	± 5,50	± 6,25	± 7,00
	NW	± 0,31	± 0,45	± 0,55	± 0,65	± 0,80	± 0,95	± 1,40	± 2,00	± 2,30	± 2,60	± 2,85	± 4,00	± 5,50	± 6,25	± 7,00	± 7,75
TG9		± 0,30	± 0,49	± 0,75	± 0,90	± 1,05	± 1,25	± 1,50	± 2,25	± 3,15	± 3,60	± 4,05	± 4,45	± 6,20	± 8,50	± 10,00	± 11,50

NOTE 1 W: Tool-specific dimensions; NW: Non-tool-specific dimensions.
 NOTE 2 The differentiation of tool-specific and non-tool-specific dimension is not necessary for TG9.
 NOTE 3 Tolerance mean dimensions apply as nominal sizes for moulded part drawings ($N_T = C_T$). For tolerancing of the distance between parallel surfaces that do not face each other directly but are arranged shifted to one another, the D_D dimension according to 7.2 of this standard is to be used as nominal size.
 NOTE 4 Dimensions under 1 mm and above 1 000 mm are subject to mandatory agreement.
 NOTE 5 Only the limit values for non-tool-specific dimensions are to be used for general tolerances.
 NOTE 6 Tolerances for material thicknesses are subject to mandatory agreement.
 NOTE 7 General tolerances are to be indicated in the design documentation as follows. Example: DIN 16742 – TG6.
 NOTE 8 For validation of machine and process capability, see Annex E.

Figura 36. Tabela de tolerâncias dimensionais para produtos plásticos [53]

ANEXO V - Tabela de índice de segurança dos materiais

Material	Symbol	Overall Material Insecurity	Material Risk				Supply Risk			
			A - Global Consumption	B - Substitutability	C - GWP	D - TMR	E - Scarcity	F - Monopoly Supply	G - Political Stability	H - CC Vulnerability
Gold	Au	21	2	2	3	3	3	2	3	3
Rhodium	Rh	20	1	3	3	3	2	3	2	3
Mercury	Hg	20	2	2	3	2	2	3	3	3
Platinum	Pt	20	1	2	3	3	3	3	2	3
Strontium	Sr	19	2	3	2	2	2	2	3	3
Silver	Ag	19	2	2	3	2	3	1	3	3
Antimony	Sb	19	2	2	2	1	3	3	3	3
Tin	Sn	19	2	3	2	2	3	1	3	3
Magnesium	Mg	18	2	3	2	1	2	2	3	3
Tungsten	W	18	2	2	2	2	2	2	3	3
Baryte	BaSO ₄	18	2	2	2	2	2	2	3	3
Talc	H ₂ Mg(SiO ₃) ₂	18	2	2	2	2	2	2	3	3
Bismuth	Bi	18	2	2	2	2	2	2	3	3
Palladium	Pd	18	1	2	3	3	3	2	3	1
Nickel	Ni	18	3	2	2	2	3	2	3	1
Boron	B	18	3	2	2	1	2	3	3	2
Andalusite	Al ₂ SiO ₅	18	2	2	2	2	2	3	2	3
Molybdenum	Mo	17	2	3	2	2	2	2	2	2
Zinc	Zn	17	3	2	1	1	3	1	3	3
Holmium	Ho	17	1	2	2	2	2	2	3	3
Terbium	Tb	17	1	2	2	2	2	2	3	3
Fluorspar	CaF ₂	17	2	2	1	2	2	2	3	3
Arsenic	As	17	2	2	2	1	2	2	3	3
Graphite	C	17	2	2	1	2	2	2	3	3
Ammonia	NH ₃	17	2	2	2	2	2	1	3	3
Cobalt	Co	17	2	2	2	2	2	2	3	2
Europium	Eu	17	1	2	2	2	2	2	3	3
Gadolinium	Gd	17	1	2	2	2	2	2	3	3
Osmium	Os	17	1	2	2	3	2	2	3	2
Borate	B(OH) ₃	17	3	2	2	2	2	1	3	2
Niobium	Nb	17	2	2	2	2	2	2	2	3
Kyanite	Var	17	2	2	2	2	2	3	2	2
Beryllium	Be	17	2	2	2	2	2	3	2	2
Ruthenium	Ru	16	1	3	2	2	2	2	3	1
Germanium	Ge	16	1	3	2	2	2	2	2	2
Chromium	Cr	16	2	3	2	1	1	2	2	3
Diamonds	C	16	2	2	2	2	2	1	3	2
Asbestos	Var.	16	2	2	2	2	2	2	3	1
Vanadium	V	16	2	2	2	2	2	2	2	2
Barium	Ba	16	2	2	2	2	2	2	2	2
Vermiculite	Var	16	2	2	1	2	2	2	2	3
Tellurium	Te	16	1	2	2	3	2	2	2	2
Diatomite	Var	16	2	2	2	2	2	2	2	2
Mica	Var	16	2	2	2	2	2	2	2	2
Lead	Pb	16	2	2	1	2	3	2	2	2
Gallium	Ga	16	1	2	3	2	2	2	2	2
Indium	In	16	2	2	3	2	3	2	1	1
Iodine	I	16	2	2	2	2	2	2	1	3
Copper	Cu	16	3	1	2	2	3	1	1	3
Iron	Fe	15	3	3	1	1	1	2	2	2
Zirconium	Zr	15	2	3	2	2	2	2	1	1
Feldspar	Var	15	2	2	2	2	2	1	2	2
Selenium	Se	15	2	2	2	1	2	2	2	2
Lutetium	Lu	15	1	2	2	2	2	2	2	2
Bromine	Br	15	1	2	2	2	2	2	2	2
Benlonite	Var	15	2	2	1	2	2	2	2	2
Perlite	Var	15	2	2	1	2	2	2	2	2
Soda Ash	Na ₂ CO ₃	15	2	2	2	2	2	1	2	2
Silicon	Si	15	3	2	2	1	2	1	2	2
Rhenium	Re	15	1	2	2	2	2	2	1	3

Figura 37. Índice de segurança dos materiais

ANEXO VI – Cálculo do indicador RDI para o caso de estudo 1

		Mi (g)	Ci (*)	Si	Ri
Peça injetada	PC/ABS	296	0.978	12	0
	Borracha TPE	6.4	0.021	13	0
Peça pintada + montada	Tinta base diluente	4.76	0.015	17	0
	Aço	2.76	0.008	15	0

*Necessário o cálculo de Ci

$$C_i = \frac{M_i}{M_{total}}$$

K	Htop	Stop	Rtop
-1	3.5	24	9

1- Peça injetada

1) Cálculo D_S

$$H = K \sum_{i=1}^M C_i \log C_i \quad \boxed{H = 0.04}$$

$$D_S = 1 - \left(\frac{H}{H_{top}} \right) \quad \boxed{D_S = 0.99}$$

2) Cálculo D_{MSI}

$$D_{MSI} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i S_i}{M_T S_{top}} \right) \quad \boxed{D_{MSI} = 0.50}$$

3) Cálculo D_{TRL}

$$D_{TRL} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i R_i}{M_T R_{top}} \right) \quad \boxed{D_{TRL} = 1}$$

Índice de desejabilidade da reciclagem

$$\boxed{RDI = D_S + D_{MSI} + D_{TRL} = 2.49}$$

2- Peça pintada + montagem

1) Cálculo D_S

$$H = K \sum_{i=1}^M C_i \log C_i \quad \mathbf{H = 0.097}$$

$$D_S = 1 - \left(\frac{H}{H_{top}} \right) \quad \mathbf{D_S = 0.98}$$

2) Cálculo D_{MSI}

$$D_{MSI} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i S_i}{M_T S_{top}} \right) \quad \mathbf{D_{MSI} = 0.49}$$

3) Cálculo D_{TRL}

$$D_{TRL} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i R_i}{M_T R_{top}} \right) \quad \mathbf{D_{TRL} = 0.99}$$

Índice de desejabilidade da reciclagem

$$\mathbf{RDI = D_S + D_{MSI} + D_{TRL}} \\ \mathbf{= 2.46}$$

ANEXO VII – Cálculos intermédios do indicador VRE para o caso de estudo 1

Injeção	
tempo (s)	Potência (kW)
0	0
2	12.14
4	17.86
6	7.13
8	7.58
10	9.99
12	13.47
14	4.83
16	4.45
18	5.94
20	4.58
22	11.45
24	4.27
26	36.45
28	47.94
30	58.08
32	23.54
34	6.88
36	13.74
38	5.96
40	7.39
42	5.11
44	11.31
46	11.45
48	7.03
50	10.04
52	8.18
54	2.65
55	0.1
média	12.39793103

Montagem		
I (A)	tempo (s)	Potência (kW)
1.6	0	0.96
2.7	2	1.62
2	4	1.2
1.8	6	1.08
3.1	8	1.86
2.4	10	1.44
2.8	12	1.68
2.2	14	1.32
2.6	16	1.56
2.5	18	1.5
2.3	20	1.38
3	22	1.8
2.4	24	1.44
2.6	26	1.56
2.2	28	1.32
2.5	30	1.5
2.2	32	1.32
2.7	34	1.62
2.3	36	1.38
2.2	38	1.32
2.3	40	1.38
2	42	1.2
1.7	44	1.02
1.8	46	1.08
1.9	48	1.14
1.7	50	1.02
2.1	52	1.26
1.7	54	1.02
1.4	56	0.84
1.3	58	0.78
1.2	60	0.72
1.4	62	0.84
média	média	1.32

Pintura	
I (A)	Potência(kW)
97	58.2
98	58.8
96	57.6
65	39
66	39.6
67	40.2
média	48.9

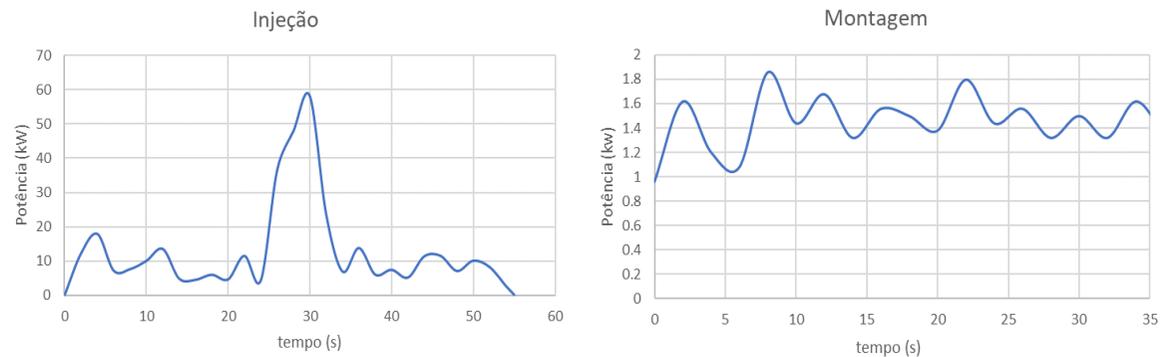


Figura 38. Gráficos da potência consumida na injetora e máquina de montagem

Figura 39. Dados da potência

ANEXO VIII – Cálculo do indicador VRE para o caso de estudo 1

Tabela 25. Cálculo do fator: Energia

		ENERGIA
		BFS
Injeção	P(kW)	12,4
	Tempo de atuação (h)	5427,09
	Energia consumida (kWh)	67295,92
Pintura	P (kW)	48,9
	Tempo de atuação (h)	85,62
	Energia consumida (kWh)	4186,73
Montagem	P (kW)	1,32
	Tempo de atuação (h)	197
	Energia consumida (kWh)	259,72
		p_e
		0,2912 €
		X_e
		71742,4
		E
		20 891,4 €

Tabela 26. Cálculo do fator: Serviços

		SERVIÇOS
		BFS
Injeção	Tempo de ciclo	82,97
	nº cavidades	1
	nº operadores	0,25
	$C_{\text{processo/peça}}$	0,7438 €
Pintura	Tempo de ciclo	7200
	nº cavidades	1200
	nº operadores	10
	$C_{\text{processo/peça}}$	0,355 €
Montagem	Tempo de ciclo (s)	13,86
	nº cavidades	1
	nº operadores	1
	$C_{\text{processo/peça}}$	0,062 €
		p_s
		1,321 €
		X_s
		51 106
		S
		67 511 €

Tabela 27. Cálculo do fator: Matéria-prima

		MATÉRIA-PRIMA
		BFS
Injeção	XM	71208.245
	pM	1.11 €
	M	78716.442
Pintura	XM	4778.787
	pM	10.54 €
	M	50368.418
		M
		129084.860 €

$$GO = 19.99 \times 51\ 106 = 1021608 \text{ €}$$

$$VRE = 5,36$$

ANEXO IX – Cálculo do indicador RDI para o caso de estudo 2

Cenário real (10% fibra vidro)

Material	Mi (g)	Ci (*)	Si	Ri
PC/ABS	251.3	0.479	13	0
ABS	168	0.320	13	0
PC/ABS+10%fibra	102	0.194	14	0
Aço	4	0.0076	15	0

*Necessário o cálculo de Ci

$$C_i = \frac{M_i}{M_{total}}$$

K	Htop	Stop	Rtop
-1	3.5	24	9

1) Cálculo D_S

$$H = K \sum_{i=1}^M C_i \log C_i$$

H = 0.47

$$D_S = 1 - \left(\frac{H}{H_{top}} \right)$$

Ds = 0.87

2) Cálculo D_{MSI}

$$D_{MSI} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i S_i}{M_T S_{top}} \right)$$

D_{MSI} = 0.55

3) Cálculo D_{TRL}

$$D_{TRL} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i R_i}{M_T R_{top}} \right)$$

D_{TRL} = 0.98

Índice de desejabilidade da reciclagem

$$RDI = D_S + D_{MSI} + D_{TRL}$$

= 2.40

Cenário 2 (0% fibra de vidro)

Material	Mi (g)	Ci (*)	Si	Ri
PC/ABS	353.3	0.479	13	0
ABS	168	0.320	13	0
Aço	4	0.0076	15	0

K	Htop	Stop	Rtop
-1	3.5	24	9

1) Cálculo D_S

$$H = K \sum_{i=1}^M C_i \log C_i$$

$H = 0.29$

$$D_S = 1 - \left(\frac{H}{H_{top}} \right)$$

$D_S = 0.92$

2) Cálculo D_{MSI}

$$D_{MSI} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i S_i}{M_T S_{top}} \right)$$

$D_{MSI} = 0.54$

3) Cálculo D_{TRL}

$$D_{TRL} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i R_i}{M_T R_{top}} \right)$$

$D_{TRL} = 1$

Índice de desejabilidade da reciclagem

$$RDI = D_S + D_{MSI} + D_{TRL}$$

$$= 2.46$$

ANEXO X – Cálculo do indicador CDG

Grupo	Diretrizes de design circular	Margem de melhoria (M)	Relevância (R)
<i>Extensão da vida útil</i>	Design atemporal; Adaptabilidade; Atual.	1	1
		2	
		1	
<i>Desmontagem</i>	<i>Conectores</i> Uso de conectores padronizados; Uso de conectores que possam ser desmontados em vez de fixos; Uso de parafusos do mesmo tamanho; Minimizar os tipos de conectores; Uso de conectores acessíveis e fáceis de desmontar; Minimizar o uso de conectores; Uso de ferramentas padronizadas.	3	3
		3	
		1	
		3	
		3	
		3	
		1	
	<i>Estrutura do produto</i> Adotar designs modulares; Minimizar o número de componentes; Conectores fáceis e de rápida identificação; Dimensionamento de componentes para facilitar o manuseamento; Facilitar a acessibilidade aos componentes essenciais; Evitar a desmontagem de peças em direções opostas; Projetar para a desmontagem automática.	2	2
		3	
		2	
		1	
		1	
		2	
		2	
<i>Reutilização do produto</i> Projetar para evitar a acumulação de sujidade; Usar materiais que resistam a processos de limpeza; Minimizar o uso de peças que requeiram reparos/substituições frequentes; Utilizar componentes com a mesma vida útil; Incorporação de sistemas para monitorizar componentes com falha.	1	2	
	1		
	2		
	3		
	3		
<i>Reutilização de componentes</i> Uso de componentes padronizados; Minimizar variações de utensílios.	3	1	
	1		
<i>Reciclagem de materiais</i> Usar materiais compatíveis com a reciclagem; Uniformizar os materiais nos componentes unidos por conectores fixos; Uso de materiais de baixo impacto ambiental; Promover projetos monomateriais; Evitar tratamentos de superfície; Rotular os materiais; Minimizar o uso de materiais perigosos.	3	3	
	3		
	3		
	3		
	2		
	1		
	3		

ANEXO XI – Cálculo do indicador CDG

Diretrizes de design circular	Nível de melhoria da circularidade (M*R)	Média
Design atemporal;	1	1
Adaptabilidade;	2	
Atual.	1	
Uso de conetores padronizados;	9	7
Uso de conetores que possam ser desmontados em vez de fixos;	9	
Uso de parafusos do mesmo tamanho;	3	
Minimizar os tipos de conetores;	9	
Uso de conetores acessíveis e fáceis de desmontar;	9	
Minimizar o uso de conetores;	9	
Uso de ferramentas padronizadas.	3	
Adotar designs modulares;	4	4
Minimizar o número de componentes;	6	
Conetores fáceis e de rápida identificação;	4	
Dimensionamento de componentes para facilitar o manuseamento;	2	
Facilitar a acessibilidade aos componentes essenciais;	2	
Evitar a desmontagem de peças em direções opostas;	4	
Projetar para a desmontagem automática.	4	
Projetar para evitar a acumulação de sujidade;	2	4
Usar materiais que resistam a processos de limpeza;	2	
Minimizar o uso de peças que requeiram reparos/substituições frequentes;	4	
Utilizar componentes com a mesma vida útil;	6	
Incorporação de sistemas para monitorizar componentes com falha.	6	
Uso de componentes padronizados;	3	2
Minimizar variações de utensílios.	1	
Usar materiais compatíveis com a reciclagem;	9	8
Uniformizar os materiais nos componentes unidos por conetores fixos;	9	
Uso de materiais de baixo impacto ambiental;	9	
Promover projetos monomateriais;	9	
Evitar tratamentos de superfície;	6	
Rotular os materiais;	3	
Minimizar o uso de materiais perigosos.	9	