



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Ecodesign de um apoio de braço para automóvel produzido na CIE Plasfil: uma abordagem de Ciclo de Vida

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

Joana Rosa Alves Gouveia

Orientadores

Fausto Miguel Cereja Seixas Freire

João Manuel Nogueira Malça de Matos Ferreira

Júri

Presidente Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor João M. N. Malça de Matos Ferreira
Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Coimbra

Colaboração Institucional



CIE Plasfil, Plásticos da Figueira, S.A.

Coimbra, Setembro, 2015

“Never doubt that a small group of thoughtful, committed citizens can change the world; indeed, it is the only thing that ever has.”

Margaret Mead, citada em *Making it Happen*, 1982.

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação de mestrado marca o final de uma etapa na minha vida à qual quero prestar os meus sinceros agradecimentos às pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o meu sucesso tanto a nível académico como pessoal, enchendo estes anos académicos de boas memórias.

Começo por agradecer ao Professor Doutor Fausto Freire pelo apoio, persistência e críticas construtivas, para que o desenvolvimento desta dissertação fosse o mais rigoroso possível.

Também gostaria de agradecer ao Professor Doutor João Malça pelo apoio e orientação prestada ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas de trabalho do Centro para a Ecologia Industrial no Departamento de Engenharia Mecânica queria mostrar o meu apreço pela disponibilidade, mais concretamente à Diana Rosa pela boa disposição, conhecimentos, dicas e auxílio prestado quando mais precisei.

À empresa CIE Plasfil queria agradecer pela disponibilidade, colaboração e interesse, bem como pelos dados disponibilizados e qualidade de informação, sem os quais esta dissertação não seria possível de realizar.

Quero agradecer especialmente à minha família, pelo apoio incondicional nos bons e maus momentos e confiança nas minhas capacidades apesar da constante distância.

À Crismary, agradeço por todos estes anos de cumplicidade, amizade e apoio.

Ao Vítor, quero agradecer todo o apoio, carinho e paciência, bem como pelas ideias e ajuda prestada ao longo desta dissertação.

Não podia deixar de agradecer à malta do costume que me acompanhou ao longo destes anos todos, bem como à minha amiga dos trabalhos, Caracóis e à Noela pela companhia nesta aventura final.

Por fim, gostaria de agradecer à cidade maravilhosa de Coimbra, que me acolheu e tornou-se na minha segunda casa, à qual hei de deixar sempre muita saudade.

Resumo

O objetivo global da presente dissertação consistiu na realização de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para apoiar o ecodesign de componentes de automóvel, mais especificamente, componentes de apoios de braço (*armrest*). O estudo centrou-se no desempenho ambiental de apoios de braço para automóveis produzidos na CIE Plasfil (uma unidade industrial transformadora de plásticos por injeção): o apoio de braço B, constituído maioritariamente por aço, e o apoio de braço J, constituído na quase totalidade por plástico. No âmbito da colaboração existente entre o Centro para a Ecologia Industrial da Universidade de Coimbra e a empresa CIE Plasfil (Projeto EDIL), surgiu a oportunidade de melhoria do desempenho ambiental do apoio de braço B, desenvolvendo modelos que, desempenhando a mesma função, seriam constituídos maioritariamente por plástico, no sentido de verificar as variações ocorridas ao substituir o aço por plástico.

Consideraram-se três novos modelos de melhoria ao apoio de braço B: B1 (novo *design* B1), B2 (novo *design* B2), e B3 (novo *design* B3). Estas novas alternativas, que diferem na quantidade e tipo de matéria-prima utilizada, foram desenvolvidas pela empresa CIE Plasfil, tendo sido assegurada a componente estrutural e funcional dos modelos através dos *softwares* “Simdesigner” e “MOLDEX 3D”.

O estudo realizado abrangeu todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima, ao transporte, tratamento, produção e destino final. A unidade funcional utilizada foi um apoio de braço como componente de um veículo ligeiro de passageiros, com uma vida funcional de 200 000 km. Analisaram-se cenários de melhoria das fases de ciclo de vida, como a alteração do tipo de tecnologia utilizada na fase de injeção do plástico, substituindo as máquinas injetoras hidráulicas por máquinas elétricas. Adicionalmente consideraram-se diferentes destinos finais para os apoios de braço, analisando destinos relevantes e uma média ponderada de todos os destinos possíveis. Neste estudo analisou-se também a alteração do tipo de transporte, considerando a hipótese de transporte marítimo relativamente ao transporte rodoviário do cenário base. Por fim, estudou-se um cenário de reciclagem, onde foram analisadas hipóteses relativamente à distância de recolha do resíduo plástico até à central de reciclagem, onde é separado consoante a sua composição e reciclado,

e à distância desde a central até à CIE Plasfil. Analisou-se também a alteração da percentagem de material reciclado que é introduzido no apoio de braço (5% e 10%).

Para quantificar os impactes ambientais foram utilizados os métodos ReCiPe *Midpoint* (H) - Europe (H), CML (*Institute of Environmental Sciences*) *baseline* 2001 (*World*, 1995) e Cumulative Energy Demand (CED), dos quais foram seleccionadas nove categorias de impacte ambiental relevantes para o estudo de componentes plásticos de automóvel.

Relativamente aos resultados apresentados na fase de produção, verifica-se que o apoio de braço mais pesado (B) não foi o que apresentava maior impacte ambiental na maioria das categorias, mas sim o apoio de braço J, devido à produção do seu plástico constituinte, PBT PET GF30, que contribui com um peso relativo entre 62 e 85% dos impactes totais da produção. Quanto ao desempenho ambiental dos modelos alternativos, constatou-se que estes apresentavam reduções em relação aos apoios de braço B e J em quase todas as categorias de impacte ambiental. De todos os modelos analisados, constatou-se que o apoio de braço B3, constituído por PP GF30 e sendo o modelo mais leve, possui menores impactes ambientais em todas as categorias analisadas.

Na fase de utilização, analisou-se o desempenho ambiental dos diferentes apoios de braço num veículo ligeiro com uma vida útil de 200 000 km, através de uma fórmula que permite determinar o consumo de combustível do veículo associado ao peso de um dos seus componentes, tendo sido posteriormente quantificados os impactes referentes a esse consumo. Verificou-se que o apoio de braço J apresenta, na fase de produção, um maior impacte ambiental que o apoio de braço B, mas com a introdução da fase de utilização, o apoio de braço J acaba por apresentar menores impactes ambientais totais que o apoio de braço B.

Finalmente na análise ao desempenho ambiental do ciclo de vida dos apoios de braço, constata-se que a maioria dos impactes ambientais decorre na fase de utilização, apresentando esta fase um peso médio entre 76 a 95%. Relativamente à fase de transporte, esta tem um contributo pouco significativo para os impactes ambientais totais de ciclo de vida na maioria das categorias. Conclui-se que, dos cinco modelos analisados, o apoio de braço B3 possui menores impactes ambientais em todas as categorias. Verifica-se também que um estudo centrado apenas na fase de produção pode gerar resultados distintos dos de

um estudo que considera todas as fases de ciclo de vida, o que reitera a necessidade de conjugação da metodologia do ecodesign com a abrangência da ACV.

Relativamente aos cenários alternativos considerados, verificou-se que há uma redução dos impactes ambientais em relação ao cenário base no processo de injeção com máquinas elétricas em todas as categorias, sendo a mais relevante a categoria de Eutrofização da água doce, com uma redução média de 11%. No cenário alternativo de transportes, verificou-se que à medida que a distância ao destino final aumenta, os consequentes impactes também aumentam. Relativamente ao tipo de transporte, conclui-se que o transporte marítimo é ambientalmente favorável em relação ao transporte rodoviário, pelo que deve ser preferido dada a possibilidade de escolha.

Por fim, analisou-se a possibilidade de incorporar 5 ou 10% de material reciclado no apoio de braço B3 (pois possuiu o melhor desempenho ambiental no cenário base), verificando-se que com a incorporação de 10% de material reciclado, os impactes são menores. O cenário M10% (10% de material reciclado, da central da Marinha Grande) possui o melhor desempenho ambiental dos cenários analisados, pois houve uma maior redução dos impactes ambientais relativamente à fase de produção, excetuando na categoria da Depleção da camada de ozono, concluindo-se que, dada a possibilidade de escolha, a incorporação de 10% de material reciclado proveniente da Marinha Grande será a melhor hipótese, desde que sejam asseguradas as características funcionais e estruturais do apoio de braço.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida, ecodesign, plástico, impactes ambientais, reciclagem, injeção, componentes automóveis.

Abstract

The overall goal of this dissertation is to perform a comparative Life Cycle Assessment (LCA) to support an ecodesign analysis of automobile components, specifically armrest components. The study focused on the environmental performance of armrests for automobiles produced at CIE Plasfil (a plant that transforms plastics through injection moulding): armrest B, consisting mainly of steel, and armrest J, formed mainly by plastic. As part of the collaboration between the Center for Industrial Ecology of the University of Coimbra and the company CIE Plasfil (project EDIL), came the opportunity to improve the environmental performance of armrest B, developing models that, having the same function, would be mostly made of plastic, in order to attest the differences that occur by replacing steel with plastic.

Three improvement models were considered for the armrest B: B1 (new design B1), B2 (new design B2) and B3 (new design B3). These new alternatives, that differ from armrest B in the quantity and type of raw material used, were developed by CIE Plasfil, being the structural and functional capabilities of the component guaranteed through the software “Simdesigner” and “MOLDEX 3D”.

The study covered all stages of the life cycle, from extraction of raw materials, to transport, processing, production and final disposal. The functional unit was an armrest as a component of a passenger car, with a functional life of 200 000 kilometers. Improvement scenarios of the life cycle phases were assessed, namely an alternative to the type of technology used in the injection phase of the plastic, replacing hydraulic injection machines for electric machines. Moreover, different final destinations for the armrests were considered, analyzing relevant destinations and the weighted mean of all possible destinations. The type of transport was also assessed, with a scenario of shipping instead of the road transport in the base scenario. Finally, a scenario of recycling was studied, which included the variation of the percentage of recycled material that is incorporated in the armrest (5% and 10%), as well as different distances between plastic residue recovery and CIE Plasfil.

To quantify the environmental impacts, ReCiPe *Midpoint* (H) - Europe (H), CML (*Institute of Environmental Sciences*) *baseline* 2001 (*World*, 1995) and Cumulative Energy Demand (CED) were used, from which nine environmental impact categories relevant to the study of automobile plastic components were selected.

In the production phase, it was concluded that the heaviest armrest (B) was not the one who presented the biggest environmental impact in most of the categories, but armrest J instead, due to the production of its constituent plastic, PBT PET GF30, which contributes between 62 to 85% to the total impacts of the production phase. As for the environmental performance of the alternative models, it was found that they presented improvement relatively to armrest B and J, in almost all the environmental impact categories. Of the analysed models, it was found that armrest B3, constituted by PP GF30, and being the lightest model, had the best environmental performance in all impact categories.

In the use phase, the environmental impacts of the armrests were quantified for a passenger vehicle with a service life of 200 000 km, through a formula that allowed to determine the consumption of fuel associated to the weight of one of its components, from which the impacts due to this consumption were determined. It was found that armrest J had in the production phase a bigger environmental impact than armrest B, but when the use phase was taken into account, armrest J presented lower environmental impacts than armrest B.

Considering the overall life cycle, the majority of the environmental impacts occurred in the use phase (76 to 95% of the life cycle impacts), followed by the production and transport phases. From the five models analysed, armrest B3 had smaller environmental impacts in all the categories. It was also concluded that a study focused solely in the production phase can generate different results from a study that considers all life cycle phases, which reaffirms the need to combine the ecodesign methodology with the scope of ACV.

From the alternative scenarios considered, it was concluded that there is a decrease of the environmental impacts regarding the base scenario in the injection with electric machines in all categories (most relevant was Freshwater Eutrophication, with an average decrease of 11%). In the alternative scenarios of transport, it was verified that as the distance to the final destination increases, the impacts also increased. In terms of type of

transport, it was concluded that maritime transport has lower environmental impacts, whereby it should be preferred over road transport when possible.

Finally, in the recycling scenario, it was analysed the possibility of incorporating 5% or 10% of recycled material in the armrest with better environmental performance in the life cycle of the base scenario (armrest B3), verifying that incorporating 10% of recycled material, the impacts are lower. Scenario M10% (10% recycled material; origin: Marinha Grande) has the best environmental performance from the analysed scenarios because there was a bigger decrease of environmental impacts relatively to the production phase, except in the category of Ozone layer depletion, concluding that, given the possibility of choice, the incorporation of 10% recycled material is the best option, although it must be guaranteed the functional and structural characteristics of the armrest.

Keywords Life cycle assessment, ecodesign, plastic, environmental impacts, recycling, injection, automobile components.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	x
Siglas	xiii
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2. ECODESIGN DE COMPONENTES DE PLÁSTICO: METODOLOGIA E ESTADO DA ARTE	6
2.1. Ecodesign	7
2.2. A Avaliação de ciclo de vida e o Ecodesign	7
2.3. Estado da Arte	9
2.3.1. Categorias de Impacte Ambiental	17
2.3.2. Reciclagem	18
3. APOIO DE BRAÇO: INVENTÁRIO E CONCEÇÕES ALTERNATIVAS	21
3.1. Aplicação da metodologia ao caso de estudo	21
3.2. Apoio de braço B (aço)	22
3.3. Apoio de braço J (plástico)	25
3.4. Modelos alternativos	28
3.4.1. Apoio de braço B1	29
3.4.2. Apoio de braço B2	30
3.4.3. Apoio de braço B3	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Cenário Base	33
4.1.1. Fase de produção	34
4.1.2. Ciclo de vida	38
4.2. Cenários alternativos	43
4.2.1. Máquinas de injeção hidráulica vs. Máquinas elétricas	43
4.2.2. Transporte: Destinos finais e Tipo de transporte	46
4.2.3. Reciclagem: variação da origem do material reciclado e da percentagem incorporada	50
5. CONCLUSÕES	55
5.1. Conclusões da ACV	56
5.2. Limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APÊNDICE A – CATEGORIAS DE IMPACTE ANALISADAS	65
APÊNDICE B – RESULTADOS DA FASE DE PRODUÇÃO DOS APOIOS DE BRAÇO	67
APÊNDICE C – RESULTADOS DA FASE DE UTILIZAÇÃO DOS APOIOS DE BRAÇO	72

APÊNDICE D – RESULTADOS DO CICLO DE VIDA DOS APOIOS DE BRAÇO 76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema do estudo efetuado no âmbito desta dissertação.....	4
Figura 2.1. Ecodesign e a Avaliação de Ciclo de Vida.	6
Figura 3.1. Elementos estruturais do apoio de braço B. (Fonte: CIE Plasfil)	22
Figura 3.2. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B.....	23
Figura 3.3. Elementos estruturais do apoio de braço J. (Fonte: CIE Plasfil).....	26
Figura 3.4. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço J.....	26
Figura 3.5. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B1.....	29
Figura 3.6. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B2.....	30
Figura 3.7. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B3.....	32
Figura 4.1. Fase de produção dos apoios de braço: comparação do desempenho ambiental através dos métodos ReCiPe, CML e CED. Categorias: a) Alterações climáticas; b) Depleção da camada de ozono; c) Acidificação; d) Eutrofização da água doce; e) Eutrofização marinha; f) Oxidação fotoquímica; g) Emissão de partículas; h) Depleção abiótica; i) Energia primária de recursos não renováveis.	35
Figura 4.2. Comparação (Alterações climáticas) em função da distância percorrida pelo veículo (vida útil) por apoio de braço.	39
Figura 4.3. Ilustração do ponto de indiferença, a partir do qual um apoio de braço 2 passa a possuir maiores impactes ambientais que um apoio de braço 1.....	40
Figura 4.4. Ciclo de vida dos apoios de braço: comparação do desempenho ambiental através dos métodos ReCiPe, CML e CED. Categorias: a) Alterações climáticas; b) Depleção da camada de ozono; c) Acidificação; d) Eutrofização da água doce; e) Eutrofização marinha; f) Oxidação fotoquímica; g) Emissão de partículas; a) Depleção abiótica; b) Energia primária de recursos não renováveis.....	41
Figura 4.5. Fluxograma do ciclo de vida do apoio de braço B3 reciclado.	50
Figura Ap. 1. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Alterações climáticas e Depleção da camada de ozono.	72
Figura Ap. 2. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Acidificação e Eutrofização da água doce.....	73
Figura Ap. 3. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Eutrofização marinha e Oxidação fotoquímica.	74
Figura Ap. 4. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Emissão de partículas, Depleção abiótica e Energia primária de recursos não renováveis.	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Características relevantes de estudos selecionados de ACV e/ou ecodesign em componentes automóveis.	9
Tabela 2.2. Categorias de impacto utilizadas nos Eco-profiles da PlasticsEurope.....	18
Tabela 2.3. Tipos de reciclagem utilizados para resíduos plásticos (adaptado de Al-Salem <i>et al.</i> , 2009).....	19
Tabela 2.4. Processos que ocorrem habitualmente na reciclagem mecânica.	20
Tabela 3.1. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B. .	23
Tabela 3.2. Fluxo de matéria-prima do processo de cataforese numa peça de aço de um apoio de braço B.....	24
Tabela 3.3. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B.	24
Tabela 3.4. Quantidade de componentes apoio de braço B expedidos pela CIE Plasfil entre 2011 e 2014.	24
Tabela 3.5. Características das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço B.	25
Tabela 3.6. Fração de utilização das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço B.	25
Tabela 3.7. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço J. ...	27
Tabela 3.8. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço J.	27
Tabela 3.9. Quantidade de componentes apoio de braço J expedidos pela CIE Plasfil entre 2011 e 2014.	27
Tabela 3.10. Características das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço J.	28
Tabela 3.11. Fração de utilização das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço J.....	28
Tabela 3.12. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B1.	30
Tabela 3.13. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B1. ...	30
Tabela 3.14. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B2.	31
Tabela 3.15. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B2. ...	31
Tabela 3.16. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B3.	32
Tabela 3.17. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B3. ...	32
Tabela 4.1. Avaliação ambiental total comparativa por apoio de braço da fase de produção e redução dos impactes em relação aos apoios de braço B e J. Os valores	

negativos correspondem a um aumento dos impactes ambientais. N/A – Comparação não aplicável.....	37
Tabela 4.2. Parâmetros analisados e valores atribuídos. Os valores utilizados foram retirados de Ferreira <i>et al.</i> (2013).....	38
Tabela 4.3. Pontos de indiferença por apoio de braço existentes nas categorias de impacte ambiental analisadas. A coluna PI indica o quilómetro onde ocorre o ponto de indiferença, a partir do qual o apoio de braço na coluna final passa a possuir mais impactes ambientais que o referido na segunda coluna.	40
Tabela 4.4. Comparação entre uma máquina hidráulica e uma máquina elétrica relativamente à potência média absorvida (Fonte: CIE Plasfil).	43
Tabela 4.5. Comparação dos consumos de energia associados à produção dos apoios de braço plásticos entre máquinas hidráulicas e máquinas elétricas.....	44
Tabela 4.6. Comparação dos resultados entre o cenário base e o cenário alternativo da máquina elétrica.	45
Tabela 4.7. Cenários considerados para a análise de sensibilidade à fase de Transporte. ..	46
Tabela 4.8. Comparação dos impactes ambientais por apoio de braço B3 entre os cenários alternativos de transporte e o cenário base. Os valores negativos correspondem a um aumento dos impactes ambientais.	49
Tabela 4.9. Cenários alternativos de recolha e reciclagem de resíduos de PP através de um camião de 20 toneladas.....	51
Tabela 4.10. Estudos considerados de modo a determinar a distância média de recolha para a central de reciclagem.	52
Tabela 4.11. Comparação dos impactes ambientais por apoio de braço B3 entre os cenários alternativos de reciclagem e o cenário base. Os valores negativos correspondem a um aumento dos impactes ambientais.	54
Tabela Ap. 1. Métodos de cálculo selecionados e descrição das respetivas categorias de impacte ambiental.....	65
Tabela Ap. 2. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.	67
Tabela Ap. 3. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço J através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.	68
Tabela Ap. 4. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B1 através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.	69
Tabela Ap. 5. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B2 através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.	70
Tabela Ap. 6. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B3 através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.	71
Tabela Ap. 7. Comparação do desempenho ambiental do ciclo de vida por apoio de braço B e J através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.....	76

Tabela Ap. 8. Comparação do desempenho ambiental do ciclo de vida por apoio de braço novos modelos através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.....	77
---	----

SIGLAS

ABS – Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

AICV – Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida

CCV – Custo de Ciclo de Vida

CED – *Cumulative Energy Demand* (Requisitos de energia primária total)

CML – *Institute of Environmental Sciences*

EDIL – *Ecodesign and Impact Labelling*

ELCD v.2.0. – *European Life Cycle Database*

EoL – *End of Life* (Fim de vida)

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FU – Fração de utilização

GEE – Gases de efeito de estufa

GF – *Glass Fiber* (fibra de vidro)

GMT – *Glass-Matreinforced Thermoplastic*

IA – Impacte Ambiental

ICV – Inventário de Ciclo de Vida

LEC – *Lifetime Energy Consumption* (Consumo energético total no ciclo de vida)

ND_B1 – Novo *design* B1

B2 – Novo *design* B2

B3 – Novo *design* B3

NOK – Peças rejeitadas por defeitos de processo

OEM – *Original Equipment Manufacturer*

PA 6.6 – Poliamida 6.6

PBT – Tereftalato de polibutileno

PC – Policarbonato

PET – Tereftalato de polietileno

POM – Polióxido de Metileno

PP – Polipropileno

SMC – *Sheet Moulding Compound*

SrPET – *Self-reinforced Polyethylene Terephthalate*

SRIM CF – *Structural Reaction Injection Moulding with Carbon Fiber*

SRIM GF – *Structural Reaction Injection Moulding with Glass Fiber*

UF – Unidade funcional

VFV – Veículo em fim de vida

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A indústria automóvel tem vindo a evoluir em termos tecnológicos e competitivos, onde o desenvolvimento sustentável vem desempenhando um papel de relevo em todo este processo devido às atuais preocupações ambientais. Nesta temática, têm sido desenvolvidos vários estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) a componentes automóveis de modo a melhorar o seu desempenho ambiental. A metodologia da ACV analisa quantitativamente os impactes ambientais de um processo (ou produto) ao longo do seu ciclo de vida numa perspetiva holística, sendo possível analisar as várias fases de ciclo de vida do caso em estudo, separadamente ou em conjunto, podendo o estudo ser feito desde a extração das matérias-primas até ao destino final (*cradle-to-grave*). Uma das vantagens da ACV é a identificação das fases-chave (*hot-spots*) no ciclo de vida que mais contribuem para os impactes ambientais totais, significando que ao concentrar as medidas de aperfeiçoamento nessas fases, é possível melhorar mais eficazmente o desempenho ambiental global do processo/produto. Para ter em consideração o fator da funcionalidade dos processos/produtos, nomeadamente em termos estruturais, mecânicos e económicos, desenvolvem-se estudos de ecodesign, que concentram a análise na fase de produção do produto/processo, procurando várias soluções de melhoria, não só em termos estruturais e económicos, mas também em termos ambientais, permitindo assim implementar a componente ambiental nos vários processos de decisão relativamente ao *design* do produto/processo, sem descurar a funcionalidade estrutural e mecânica do mesmo.

O principal objetivo desta dissertação consistiu na realização de uma ACV a componentes de automóvel, mais especificamente a componentes de apoios de braço (*armrest*), através de uma análise do tipo “top-down” aplicada à empresa CIE Plasfil, uma unidade industrial transformadora de plásticos por injeção, localizada na Figueira da Foz. Esta dissertação decorreu em paralelo com o Projeto EDIL (*Ecodesign and Impact Labelling*), entre a empresa e o Centro de Ecologia Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC). Este projeto teve como principais objetivos a avaliação do desempenho ambiental de ciclo de vida e a caracterização e

validação do ecodesign em componentes plásticos para a indústria automóvel produzidos na CIE Plasfil.

O estudo efetuado no âmbito desta dissertação está esquematizado na Figura 1.1. Do portfólio da CIE Plasfil fazem parte dois modelos de apoio de braço: o apoio de braço B, constituído maioritariamente por aço, que é montado na empresa, e o apoio de braço J, cujo principal constituinte é o plástico PBT PET GF30 (uma mistura de Tereftalato de polibutileno e Tereftalato de polietileno reforçado com 30% de fibra de vidro), produzido na CIE Plasfil. Dado que a empresa trabalha com componentes plásticos, surgiu a oportunidade de comparar o desempenho ambiental do apoio de braço B com uma solução plástica, aplicando a metodologia da ACV e o ecodesign, estudando-se as várias opções de otimização do desempenho ambiental do modelo, sem descurar o seu desempenho funcional.

No departamento de I&DT da CIE Plasfil foram analisados inicialmente vários modelos de apoio de braço relativamente à sua funcionalidade, com diferentes tipos e quantidades de plástico, com o auxílio dos programas Simdesigner e MOLDEX 3D. Destes, foram selecionados três versões de apoio de braço que cumpriam os requisitos funcionais e possuíam um peso inferior: o apoio de braço B1, constituído maioritariamente por PBT PET GF30 (obtido através da redução do peso do apoio de braço J); B2, que possui também PBT PET GF30, mas em menor quantidade, fruto de uma redução na espessura e B3 cujo plástico constituinte é o PP GF30 (polipropileno com 30% de fibra de vidro).

Com base nesta análise prévia de otimização estrutural efetuou-se um estudo de ACV comparativa dos cinco modelos de apoio de braço. A Avaliação de Ciclo de Vida é crucial, porque um estudo centrado apenas na fase de produção pode originar resultados diferentes dos fornecidos por um estudo que considera todas as fases de ciclo de vida. Desta forma, os estudos de ecodesign têm de integrar os aspetos ambientais no *design* do produto e no processo de desenvolvimento e fabrico do mesmo com uma perspetiva global de ciclo de vida, sem descurar os critérios tradicionais de *design*, garantindo assim a funcionalidade e a qualidade do produto.

Apesar de não ter sido feita uma análise na perspetiva de ecodesign ao apoio de braço J, este foi incluído no estudo de ACV de modo a quantificar os benefícios a nível de desempenho ambiental das modificações introduzidas nos diferentes modelos considerados.

Nesta dissertação, analisaram-se todas as fases de ciclo de vida de cada apoio de braço, desde a extração da matéria-prima, produção, fase de utilização e destino final, incluindo atividades de transporte, quantificando-se as categorias de impacto ambiental através dos métodos ReCiPe *Midpoint* (H) - Europe (H), CML (*Institute of Environmental Sciences*) *baseline* 2001 (*World*, 1995) e Cumulative Energy Demand (CED).

De modo a verificar a influência dos pressupostos assumidos e dos processos e parâmetros relevantes no desempenho ambiental global de ciclo de vida dos apoios de braço, efetuou-se uma análise de sensibilidade a várias hipóteses de melhoria, nomeadamente: substituição das máquinas hidráulicas de injeção de plásticos por máquinas elétricas; alteração dos destinos finais dos apoios de braço após saída da CIE Plasfil; incorporação de materiais reciclados na constituição dos apoios de braço, estudando diferentes percentagens incorporadas e diferentes origens do material reciclado.

Com os resultados obtidos neste estudo, pretende-se determinar o desempenho ambiental dos cinco apoios de braço, bem como quantificar a influência das várias alternativas estudadas. Com isto, será possível identificar as soluções técnicas com menor impacto ambiental tanto a nível da fase de produção como a nível do ciclo de vida dos apoios de braço, reforçando assim a importância da perspectiva de uma visão completa na vida do produto aquando da tomada de decisões a nível do seu *design*.

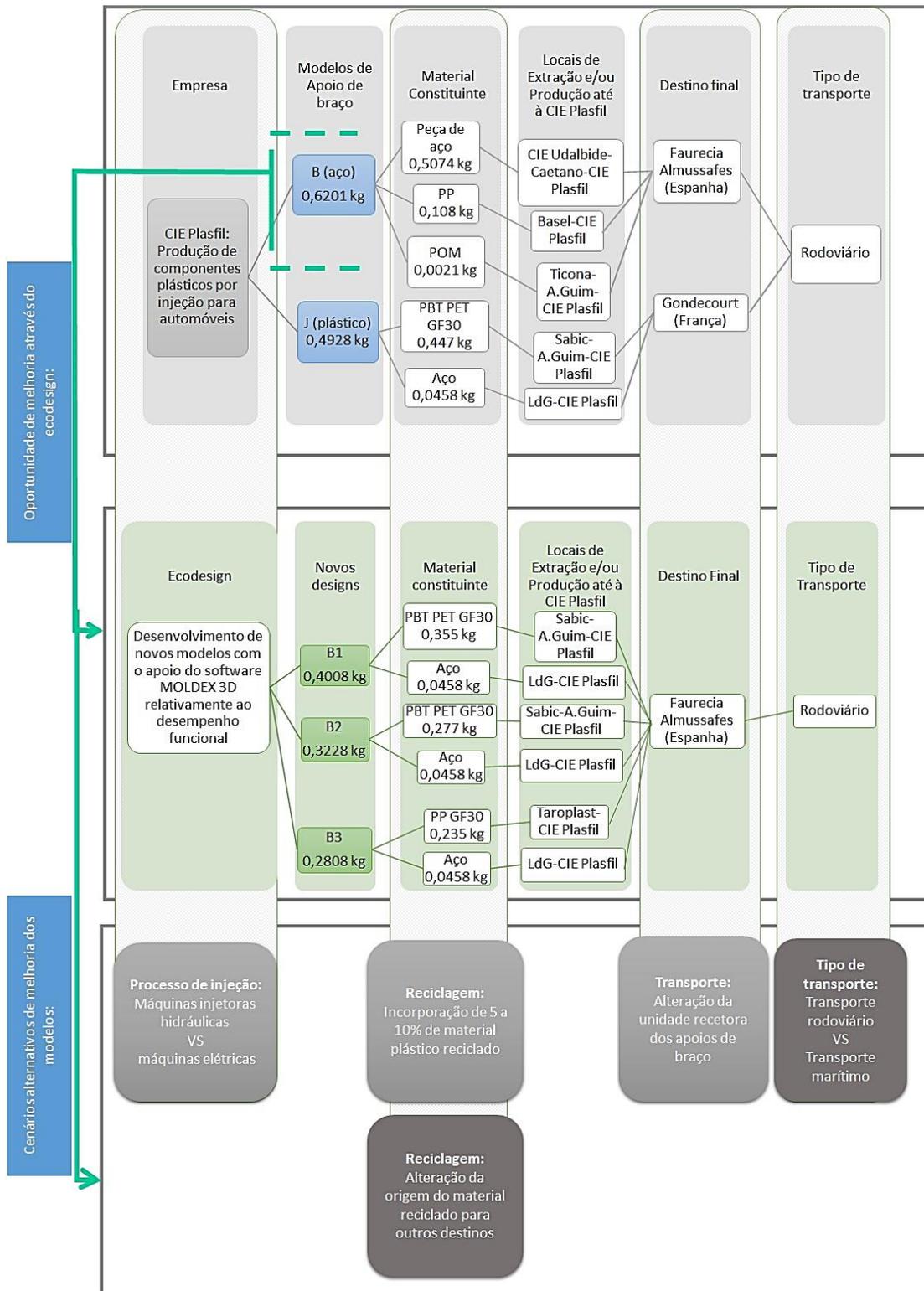


Figura 1.1. Esquema do estudo efetuado no âmbito desta dissertação.

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos. Após esta Introdução, no Capítulo 2. “Ecodesign de componentes de plástico: Metodologia e Estado da arte” é feita uma breve explicação sobre a metodologia de avaliação de ciclo de vida e o ecodesign, bem como uma análise de vários estudos versando a temática desta dissertação. No Capítulo 3. “Apoio de braço: inventário e conceções alternativas” apresentam-se os dados referentes à produção de cada um dos apoios de braço, bem como uma explicação do seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima necessária à produção, até à expedição do componente ao seu recetor final. No Capítulo 4. “Resultados e discussão” é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos, bem como uma análise de sensibilidade a diversos parâmetros e processos envolvidos no ciclo de vida dos apoios de braço. No Capítulo 5. “Conclusão” são apresentadas as principais conclusões do trabalho efetuado nesta dissertação, incluindo limitações do estudo e sugestões para trabalho futuro.

2. ECODESIGN DE COMPONENTES DE PLÁSTICO: METODOLOGIA E ESTADO DA ARTE

A sustentabilidade é hoje em dia uma temática bastante ativa na indústria automóvel. Devido ao aumento das preocupações ambientais, foram desenvolvidos estudos com o intuito inicial de cumprir legislações ambientais, mas que são simultaneamente uma forma eficaz de ganhar destaque e vantagem competitiva no mercado. Muitos desses estudos são suportados pela metodologia da ACV e pelo ecodesign (Figura 2.1), com o objetivo principal de determinar e otimizar o desempenho ambiental de componentes automóveis. A maioria dos estudos centra-se na substituição da matéria-prima original do componente por um material mais leve, dado que a diminuição de peso do componente leva a uma diminuição dos impactes decorrentes na fase de utilização do componente como peça integrante de um veículo, devido à diminuição inerente do consumo de combustível. Esta diminuição é bastante relevante, dado que é na fase de utilização que ocorrem a maioria dos impactes ambientais do ciclo de vida do componente.

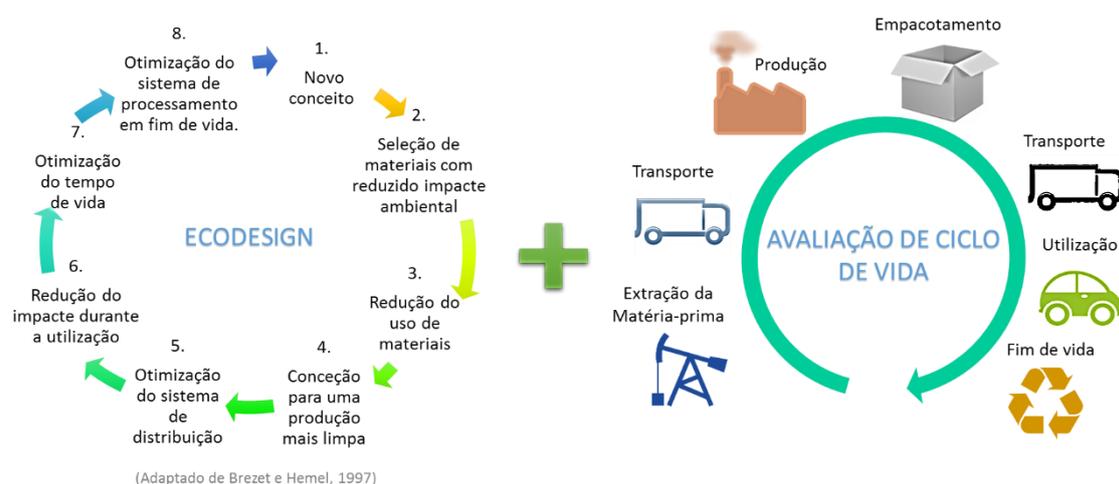


Figura 2.1. Ecodesign e a Avaliação de Ciclo de Vida.

2.1. Ecodesign

O ecodesign é uma metodologia aplicada normalmente nas fases de produção de um componente, aquando da necessidade de melhoria do seu *design*, tanto a nível estrutural como a nível processual de fabrico. Consiste na implementação dos aspetos ambientais nos processos de decisão tradicionais de *design* de produtos (manufaturabilidade, funcionalidade, durabilidade, custos, segurança) ou sistemas, de modo a proporcionar melhores decisões relativamente ao desempenho funcional e ambiental do produto. Ferrão (2009) e Brezet e Hemel (1997) estruturaram critérios de otimização geral que podem ser utilizados nos estudos de ecodesign, sendo estes os apresentados na Figura 2.1 no esquema do ecodesign.

O ecodesign tem vindo a tornar-se uma ferramenta importante para a indústria automóvel devido à integração da possibilidade de melhoria do desempenho ambiental dos componentes automóveis ainda na fase de conceção. A utilização desta metodologia para a seleção dos materiais constituintes de um produto permite, para além de considerar os critérios técnicos, ter em consideração os impactes ambientais da produção dos materiais e das tecnologias de produção do componente/processo, permitindo selecionar o melhor material e a melhor tecnologia, tanto em termos técnicos como ambientais.

2.2. A Avaliação de ciclo de vida e o Ecodesign

A abordagem de ciclo de vida implica uma visão geral de um produto ou processo, de modo a ter em conta os potenciais impactes ambientais que advêm de cada fase de vida do caso em estudo, ou seja, desde a extração das matérias-primas, passando pela produção e utilização, até à forma como na fase final o produto é reintegrado no meio ambiente, fechando assim o ciclo. A ACV está estipulada na ISO (*International Organization for Standardization*) 14040:2006 como “compilação dos fluxos de entradas e saídas dos impactes ambientais associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida”, ou seja, permite fazer uma recolha dos principais fluxos de entrada e saída de matéria e de energia, dentro de uma fronteira de sistema definida previamente, e quantificar os impactes ambientais referentes aos processos decorrentes dentro dessa fronteira.

Esta metodologia assenta numa perspetiva geral holística e sistemática, assentando nas leis da Termodinâmica relativamente à conservação de energia e à quantificação da degradação da energia, havendo assim a inexistência de processos realmente reversíveis e justificando as competências e necessidades da técnica (Ferrão, 2009). Permite a avaliação do desempenho ambiental de um produto/sistema ou a comparação de vários produtos/sistemas de modo a determinar qual é a opção mais favorável ambientalmente. A ACV geralmente está dividida em quatro fases, interligadas entre si, de modo a que ocorra um melhoramento contínuo ao longo do estudo:

- 1) Objetivos e definição de âmbito: descrição do propósito do estudo, da unidade funcional e das fronteiras do sistema em análise.
- 2) Análise do ICV (Inventário de Ciclo de Vida): Recolha de dados relativamente aos *inputs* e *outputs* do sistema, como matérias-primas e energia.
- 3) AICV: escolha e cálculo dos métodos e categorias de impacto ambiental associadas ao modelo de ciclo de vida do produto/sistema.
- 4) Interpretação e discussão dos resultados: análise e conclusões relativamente aos resultados obtidos, bem como recomendações de melhoria aos objetivos iniciais, de modo a aperfeiçoar o estudo.

Recentemente a ACV tem sido utilizada em conjunto com estudos de ecodesign de modo a permitir uma visão global do ciclo de vida analisado, e não apenas nas fases iniciais de produção do componente. Isto é particularmente importante na indústria automóvel, dado que a maioria dos impactos ambientais no ciclo de vida de componentes automóveis ocorre nas fases de utilização, dado o componente ser uma parte integrante do veículo. Segundo Mayyas *et al.* (2012), a ACV enfrenta dois desafios principais nos estudos realizados na indústria automóvel. O primeiro é a diversidade e variações existentes nos materiais, nas técnicas de processamento, nas durações da utilização do componente e nos destinos finais escolhidos; o segundo é a extensão temporal associada à realização de uma ACV, relativamente ao tempo de vida do veículo.

Quando é realizado um estudo de ACV, há que analisar as variações decorrentes da alteração de certos parâmetros de modo a compreender a influência dos mesmos no desempenho ambiental. É também necessário avaliar corretamente as alternativas

encontradas em cada investigação, de modo a evitar que os impactes ambientais de uma fase sejam transferidos para outra fase de ciclo d vida (*burden-shifting*).

A conjugação do ecodesign com a ACV é importante de modo a obter resultados para o ciclo de vida do componente, dado que resultados de uma só fase podem não refletir os resultados do desempenho ambiental de um componente ao longo da sua vida. Assim, os estudos de ecodesign, ao integrarem os aspetos ambientais no *design* do produto, têm de englobar o ciclo de vida do componente, sem descurar os critérios tradicionais de *design*, garantindo assim a funcionalidade e a qualidade do produto.

2.3. Estado da Arte

Na Tabela 2.1 apresentam-se as características principais de uma coleção de estudos no âmbito do ecodesign e da ACV de componentes automóveis, num total de nove estudos, publicados entre 2001 e 2015. São indicados os métodos de cálculo de impactes ambientais e respetivas categorias de impacte quantificadas (coluna Categorias de IA) e são descritos os cenários de fim de vida considerados nos estudos (coluna EoL, *end of life*). Os estudos que indiquem “N/A” nesta coluna implicam que o âmbito de estudo não engloba o fim de vida.

Tabela 2.1: Características relevantes de estudos selecionados de ACV e/ou ecodesign em componentes automóveis.

Artigo	Objetivo	Metodologia	Unidade funcional	Categorias de IA	EoL
Alves <i>et al.</i> (2010)	Substituição da fibra de vidro por fibras naturais de juta.	Ecodesign + ACV (<i>cradle-to-grave</i>)	1 Capô frontal de um <i>Buggy</i>	<u><i>Eco-indicator-99</i></u> : <i>A/E; C; CC; EcTx; FF; LU; M; OL; Rad; RI; RO.</i>	Reciclagem, Incineração e Deposição em aterro.
Ferreira <i>et al.</i> (2013)	Estudo comparativo de dois apoios de braço produzidos na empresa CIE Plasfil	Ecodesign + ACV (<i>cradle-to-gate + use phase</i>)	1 <i>armrest</i> num veículo com vida útil de 200 000 km.	GEE	N/A
Kampe (2001)	Metodologia para determinar a carga	Ecodesign	-	LEC	N/A

	ambiental associada à seleção de um material.				
Luz <i>et al.</i> (2009)	ACV à substituição de talco por fibras de bagaço de cana-de-açúcar, como reforço em compostos de polipropileno (PP).	Ecodesign + ACV (<i>cradle-to-grave</i>)	Área de superfície coberta, m ² .	<u>CML 2001:</u> ADP; AP; EP; GWP; ODP; POCP.	Reciclagem, Incineração, Recuperação Económica e Deposição em aterro.
Poulikidou <i>et al.</i> (2015)	Abordagem integral de seleção de materiais e ACV, associando a redução do peso de componentes automóveis com o desempenho ambiental.	Ecodesign + ACV (<i>cradle-to-grave</i>)	Um teto de um camião com uma vida útil de 100 000 km percorridos.	<u>CED;</u> GWP.	Reciclagem, Incineração e Deposição em aterro.
Roes <i>et al.</i> (2007)	Estudo sobre a substituição de materiais convencionais por nanocompósitos.	ACV (<i>cradle-to-grave</i>) + LCC	3,66 kg de película para fazer 1000 sacos de 200 g de doces; 2,38 t de película para cobrir uma estufa de tomate com 650 m ³ de volume; 1 Painel de um veículo com vida útil de 150 000 km.	<u>CML 2 2000:</u> NREU; CC; ADP; OLD; POCP; AP; EP.	Incineração
Safaei <i>et al.</i> (2015)	Cálculo das emissões de GEE de um componente genérico automóvel de plástico, com dados fornecidos pela CIE Plasfil.	Ecodesign + ACV (<i>cradle-to-gate</i>)	1 kg de um componente de plástico genérico produzido na CIE Plasfil	GEE	N/A
Witik <i>et al.</i> (2011)	Redução do peso de uma divisória de aço de um veículo através da substituição do material constituinte.	ACV (<i>cradle-to-grave</i>) + CCV (Custo de ciclo de vida)	Uma divisória de um veículo por uma vida de um veículo de 200 000 km.	<u>Impact 2002+:</u> CC; EQ; HH; R.	Deposição em aterro, Incineração e Reciclagem.
Zah <i>et al.</i> (2007)	Avaliação do desempenho ambiental de compósitos de fibras de Curauá em aplicações automóveis.	ACV (<i>cradle-to-grave</i>)	1 kg de um componente automóvel feito de GF num veículo com uma vida útil de 150 000 km	<u>CML 2001:</u> ADP; AP; EP; FAETP; FSETP; GWP; HTP; MAETP; MSETP; ODP; POCP; TETP.	Incineração

Legenda das categorias de impacte: ADP – Abiotic depletion potential; A/E – Acidification/Eutrophication; AP – Acidification Potential; C – Carcinogens; CC – Climate Change; EcTx – Ecotoxicity; EP – Eutrophication potential;

EQ – *Ecosystem quality*; **FAETP** *Freshwater aquatic ecotoxicity potential*; **FF** – *Fossil fuels*; **FSETP** - *Freshwater sediment ecotoxicity potential*; **GEE** – Gases de efeito de estufa; **GWP** - *Global warming potential*; **HH** – *Human health*; **HTP** - *Human toxicity potential*; **LU** – *Land use*; **M** – *Minerals*; **MAETP** - *Marine aquatic ecotoxicity potential*; **MSETP** - *Marine sediment ecotoxicity potential*; **N/A** – O âmbito de estudo não englobe o fim de vida; **NREU** – *Non-renewable energy use*; **ODP** - *Ozone layer depletion potential*; **OL** – *Ozone Layer*; **POCP** - *Photochemical ozone creation potential*; **R** – *Resources*; **Rad** – *Radiation*; **RI** – *Respiratory Inorganics*; **RO** – *Respiratory Organics*; **TETP** - *Terrestrial ecotoxicity potential*.

De seguida são desenvolvidos alguns dos aspetos apresentados na Tabela 2.1 com relevância para esta dissertação.

Safaei *et al.* (2015) e Ferreira *et al.* (2013) efetuaram estudos no âmbito do Projeto EDIL, respetivamente ao desempenho global de um componente automóvel genérico e aos apoios de braço B e J que são atualmente produzidos na CIE Plasfil e que também farão parte do estudo desta dissertação.

Em Safaei *et al.* (2015), analisou-se, através da ACV, a fase de produção de um 1 kg de um componente não especificado, considerando-se que este é constituído genericamente por 1 kg da média de plásticos processados anualmente na CIE Plasfil, com o objetivo de identificar alternativas de melhoria ao desempenho ambiental dos processos envolvidos no ciclo de vida dos componentes. A ACV efetuada considera as fases de extração de matéria-prima, o transporte e a produção do componente (*cradle-to-gate*), constatando-se na análise de resultados que, na fase de produção, as emissões de GEE devem-se principalmente ao consumo de eletricidade, especificamente na produção dos materiais base. Neste estudo foi feita também uma análise de sensibilidade aos destinos finais dos componentes, bem como ao tipo de transporte utilizado. Quantificaram-se os GEE associados a destinos comuns de componentes da CIE Plasfil, considerando-se também o destino mais próximo (Portugal) e os destinos mais longínquos (Argentina e Polónia). No caso da Argentina, o tipo de transporte é marítimo, enquanto na Polónia se analisaram as variações aquando da modificação do transporte rodoviário por um transporte rodoviário e marítimo. Verificou-se que, apesar de a Argentina ser o destino final mais longínquo, o facto de o transporte ser feito por via marítima providenciou um melhor desempenho ambiental que os destinos europeus (excetuando Portugal). Relativamente à variação do tipo de transporte para a Polónia, os impactes do cenário combinado de transporte marítimo/rodoviário, têm uma magnitude quatro vezes inferior ao cenário onde foi apenas

considerado o transporte rodoviário. No entanto, o transporte corresponde em média a 6% dos impactes totais, quando se considera o ciclo de vida total do componente.

Em Ferreira *et al.* (2013) foi feita uma comparação das emissões de GEE de dois apoios de braço produzidos na empresa CIE Plasfil, no âmbito do Projeto EDIL. Neste artigo, foram analisados um apoio de braço constituído maioritariamente por aço, denominado B, e um apoio de braço constituído principalmente por plástico, designado J. Para o cálculo das emissões de GEE na fase de utilização foi utilizada uma ferramenta de cálculo que, através de dados como o consumo do veículo [kg/km], a massa do componente e a massa do veículo [kg], a correlação entre o consumo de combustível e o peso do veículo e a distância total percorrida pelo veículo ao longo do seu tempo de vida, possibilitou a determinação do consumo de combustível associado ao componente em causa ao longo do seu tempo de vida [kg]. Após a avaliação, concluiu-se que, apesar de o apoio de braço J possuir maiores impactes na fase de produção, tendo em conta o ponto de vista global do ciclo de vida, após a introdução dos impactes referentes à fase de uso e por esta ser a fase que tem maior peso no ciclo de vida, o apoio de braço J, por ser mais leve, apresenta menores emissões de GEE que o apoio de braço B.

No que toca às fontes de dados utilizadas nos vários estudos, observou-se que os dados provinham de várias fontes devido à falta da informação necessária numa só fonte. Estas fontes incluem bases de dados gerais (exemplo da ELCD v.2.0. (*European Life Cycle Database*)), dados fornecidos pela empresa envolvida no estudo (Alves *et al.* (2010), Ferreira *et al.* (2013), Safaei *et al.* (2015), Luz *et al.* (2009)) e, quando tal não era possível, utilizando dados da literatura, bases de dados comerciais disponíveis em programas como, por exemplo, o GaBi e SimaPro, (Alves *et al.* (2010), Poulikidou *et al.* (2015), Roes *et al.* (2007), Witik *et al.* (2001), Zah *et al.* (2007)), relatórios governamentais (Alves *et al.* (2010)) e dados de associações como a *PlasticsEurope*, a *World Steel Association* e a *Japan Carbon Fibre Manufacturers Association*. É de referir que esta diversidade de fontes pode causar inconsistência nos dados, segundo Witik *et al.* (2001).

Relativamente aos estudos onde foi aplicada a metodologia da ACV, verifica-se que seis estudos abrangem o ciclo de vida completo dos seus produtos (*cradle-to-grave*), dos quais quatro consideram o cenário de reciclagem. Em todos é considerado o cenário de incineração, por ser um cenário comum no tratamento de resíduos e relevante a nível de

reaproveitamento energético. Um desses exemplos é o estudo de Roes *et al.* (2007), onde foi analisada a variação dos impactes ambientais e económicos ao longo do ciclo de vida aquando da substituição de materiais convencionais por um nanocompósito de PP, em três produtos diferentes: películas de embalagem, películas para uso agrícola e um painel de automóvel. No que toca à UF, como a função desejada varia de produto para produto, definiram-se três unidades funcionais diferentes para cada um dos produtos analisados, considerando que o nanocompósito substituiu completamente o material original, mas sem descurar a funcionalidade do produto. Em Roes *et al.* (2007), a fase de utilização foi considerada apenas no painel automóvel, ocorrendo uma redução dos impactes devido à redução do peso com a substituição do material convencional pelo nanocompósito. A fase de utilização nos restantes produtos não foi considerada pelo facto das condições nessa fase não serem alteradas com a substituição do material. Constatou-se a redução do peso de cada produto, com a substituição pelo compósito, mantendo a funcionalidade dos mesmos. O melhor resultado foi obtido no caso das películas de uso agrícola, já que nas películas de embalagens a melhoria do desempenho ambiental não foi relevante e no painel automóvel o desempenho ambiental praticamente manteve-se. Quanto à incineração, verificou-se que o material convencional apresentou melhores resultados a nível ambiental relativamente ao nanocompósito. No entanto, de um ponto de vista de ciclo de vida, é o nanocompósito que apresenta o melhor desempenho ambiental.

Relativamente à seleção da matéria-prima que constitui o componente automóvel, Poulidikou *et al.* (2015) apresentaram uma abordagem sistemática onde é conjugado o processo de seleção de materiais de modo a reduzir o peso de um componente automóvel com a Avaliação do Impacte de Ciclo de Vida (AICV). Neste estudo, é feita uma revisão dos processos e problemáticas envolvidas na seleção de materiais alternativos, sendo de salientar nesta abordagem que a AICV reduzida do componente é considerada como um requisito funcional do *design* a atingir, em conjunto com os requisitos restantes. De modo a cumprir este requisito, é necessário fazer uma análise completa dos resultados, o que pode compreender os seguintes aspetos: (i) AICV total de cada material alternativo separadamente e em comparação com os outros; (ii) desempenho ambiental de cada alternativa em diferentes fases de ciclo de vida; (iii) trocas entre fases de ciclo de vida ou indicadores de impacte ambiental; (iv) variações no *design*-alvo ou nas propriedades do

produto e no seu ciclo de vida que podem influenciar a AICV do material, tendo sempre em conta que o material ótimo é específico para cada produto analisado. Como exemplo, foi analisado um painel da cobertura de um camião, tendo como objetivo principal efetuar a seleção do material constituinte e analisar o desempenho ambiental do SrPET (*Self-reinforced Polyethylene terephthalate*) (Politereftalato de etileno autorreforçado). Este plástico, apesar de ser mais leve que o original PET e de possuir melhores propriedades mecânicas, implica à partida um maior impacte ambiental na fase de produção. Como tal, o SrPET foi comparado, relativamente ao seu desempenho funcional e ambiental, com PET, aço, alumínio e dois tipos de éster-vinil reforçados com fibras diferentes, carbono (C/VE) e vidro (G/VE). Relativamente à análise de sensibilidade efetuada, estimaram-se as variações decorrentes da eficiência do motor do camião, bem como da alteração do tipo de combustível utilizado, e da vida funcional do camião, analisando os impactes ambientais produzidos de 0 a 200 000 km. Foi feito também uma análise ao fim de vida, considerando-se cenários de fim de vida alternativos ao cenário de referência (reciclagem), como a incineração para todos os materiais com exceção dos metais e a deposição em aterro para todos os materiais considerados no estudo. Em relação ao caso de estudo, verificou-se uma redução significativa no peso do componente e que o SrPET demonstrou ser uma boa alternativa aos compósitos não-recicláveis, apesar de o alumínio também ter sido considerado uma boa alternativa devido à sua elevada reciclabilidade. Constatou-se também que um procedimento sistemático, como o realizado neste estudo, facilita a colaboração e dinamização do trabalho realizado entre diferentes grupos especializados nas funcionalidades mecânicas e estruturais de um dado produto, no que toca à seleção do material constituinte.

Em Witik *et al.* (2011) foi feito um estudo sobre a redução do peso da divisória de um componente de aço situado na traseira de um veículo de dois lugares, separando a bagageira da cabine de passageiros, através da substituição do material constituinte, comparando os materiais leves (magnésio, alumínio, SMC (*Sheet Moulding Compound*), GMT (*Glass Mat thermoplastic*), SRIM GF (*Structural Reaction Injection Moulding with Glass Fiber*), SRIM CF (*Structural Reaction Injection Moulding with Carbon Fiber*)) com o aço em termos de custos e de desempenho ambiental, com o objetivo de identificar a solução com melhores resultados em ambas as vertentes, através da ACV e da CCV (Custo de Ciclo de Vida). A análise de sensibilidade efetuada centrou-se no fabrico dos materiais,

de modo a compreender quais os processos com maior contribuição nas emissões de CO₂ equivalente e a sensibilidade a alterações dos mesmos. Constatou-se que os benefícios dos pesos reduzidos foram de extrema relevância para a melhoria do desempenho ambiental do componente, tornando a melhoria proveniente de reciclagem desprezável. Na análise de sensibilidade as fibras de carbono foram as maiores contribuintes para as emissões de CO₂ equivalente, com um peso de 82%. Finalmente, concluiu-se que, apesar da elevada dependência da qualidade dos dados utilizados, a análise de ACV com CCV permite a identificação de fases-chave a nível ambiental e económico, permitindo assim focar as estratégias de melhoria.

Relativamente ao estudo de materiais mais leves e ambientalmente mais favoráveis, têm sido desenvolvidos alguns estudos relativamente à substituição de materiais sintéticos de componentes automóveis por materiais de origem natural, cuja fácil degradação e reintegração no meio ambiente contribui geralmente para um cenário de fim de vida de baixo impacto. Neste âmbito, Alves *et al.* (2010) efetuaram um estudo sobre a utilização de fibras vegetais em componentes automóveis. Através de uma ACV, foram analisadas as implicações ambientais da substituição de fibra de vidro por fibras naturais de juta, de modo a produzir um capô frontal de um veículo todo-o-terreno (estilo *Buggy*). Uma das preocupações com a fibra de vidro incide na fase de deposição final devido à forte estrutura do material. As conclusões do estudo mostram que, tendo em conta a fase de utilização, as fibras vegetais possuem o melhor desempenho ambiental.

Na mesma temática de estudos, Luz *et al.* (2009) analisaram a substituição de compostos de PP reforçados a talco por compostos de PP reforçados por fibras de bagaço de cana-de-açúcar, através de um estudo de ACV comparativo. No cenário de referência, 50% do PP não reciclável é enviado para incineração, tendo sido considerados outros cenários alternativos relativamente ao destino final (deposição em aterro), à quantidade de resíduo enviada para incineração, aproveitamento económico e reutilização. De modo a analisar o desempenho ambiental sem ter em conta a diferença de pesos, foi elaborado um terceiro cenário, onde se considerou que o composto de PP reforçado a talco possuía uma densidade igual à do composto de PP reforçado a bagaço. Os resultados finais obtidos neste estudo revelam que o composto de PP reforçado com bagaço de cana-de-açúcar possui um desempenho ambiental superior ao composto de PP reforçado com talco, pois apresenta

menores impactes na fase de produção das matérias-primas, para além de que na fase de cultivo a cana-de-açúcar consome CO₂ o que contribui para a diminuição do seu impacte. Relativamente à fase de fim de vida, constata-se que o cenário onde há um reaproveitamento do composto de PP reforçado com bagaço possui um melhor desempenho ambiental.

O estudo de Zah *et al.* (2007) centrou-se na avaliação do impacte ambiental ao longo do ciclo de vida de compósitos de Curauá (fibras naturais de uma planta do Brasil) em aplicações automóveis, mais especificamente, num componente do interior de um veículo ligeiro, comparando a fibra natural com compósitos de fibra de vidro. Neste estudo foram analisados três cenários alternativos, de modo a simular as várias funções que um componente do interior do veículo pode ter, considerando que o compósito iria ter a mesma (i) estabilidade, (ii) peso e (iii) volume que o material base, simulando assim, respetivamente, componentes que estão sujeitos a impactes físicos no veículo, componentes cujo aspeto e sensação é relevante e componentes em que é suposto haver uma redução do peso com a substituição do material compósito. Concluiu-se que 89% dos impactes que decorrem no ciclo de vida do componente constituído pelo compósito natural ocorrem na fase de utilização do veículo, reduzindo no total 6% dos impactes obtidos com o compósito de fibra de vidro em (ii), obtendo-se também uma redução pouco significativa em (i). Só no cenário (iii) é que se verifica uma redução significativa dos impactes comparativamente ao material base, com uma redução de 30% a qual é devida ao facto de o compósito natural possuir uma densidade inferior, o que implica uma redução no peso do componente, diminuindo assim os impactes gerados na fase de utilização. Na fase de fim de vida, como o compósito natural é biodegradável, há uma redução dos impactes. No entanto, como esta fase possui um peso total no ciclo de vida inferior a 0,1 %, os benefícios não são relevantes.

No âmbito do ecodesign, destaca-se o estudo de Kampe (2001), que apresenta um método para determinar a carga ambiental associada à seleção de um material específico, avaliando a vertente ambiental como parte geral do processo de decisão na conceção funcional e mecânica de componentes. Segundo o autor, este método pode ser aplicado genericamente a qualquer aplicação, através de uma abordagem baseada em índices de seleção de matérias consoante a massa, modificando-os de modo a incluir o consumo total de energia antes e durante a sua designada função, através da estimativa de uma constante capaz de quantificar proporcionalmente o valor em massa e em termos de consumo de

energia, tendo em conta o tempo de vida desejado (*Lifetime energy consumption*). Kampe (2001) afirma que os materiais estruturais leves geralmente são mais dispendiosos e provenientes de países que obtêm pouco aproveitamento da sua exploração. No entanto, nas aplicações automobilísticas possuem uma elevada vantagem, dado que o aumento da massa neste caso diminui a eficiência do veículo, obrigando-o a consumir mais combustível. Embora este modelo seja promissor, não tem em conta a energia de extração nem de deposição necessária no ciclo de vida do material, limitando assim os seus resultados.

Dos estudos atrás apresentados, é possível concluir que a ACV e o ecodesign são metodologias úteis na determinação do desempenho ambiental de componentes automóveis, pautando pela possibilidade de análise dos impactes ambientais dos vários processos no ciclo de vida do componente, pela variedade dos métodos de avaliação de impacte ambiental e pela capacidade de melhorar o componente a nível ambiental sem afetar a funcionalidade do mesmo.

2.3.1. Categorias de Impacte Ambiental

De modo a compreender quais as categorias de impacte mais relevantes para a análise de componentes de automóvel, recorreu-se aos estudos já referidos, bem como aos estudos de desempenho ambiental de plásticos (*Eco-profiles*) realizados pela PlasticsEurope (*Association of Plastics Manufacturers*). Na Tabela 2.2 apresentam-se os *Eco-profiles* dos plásticos estudados e as categorias de impacte ambiental analisadas. Estas categorias foram selecionadas através de PlasticsEurope (2011a), que consiste num manual para a metodologia e ICV utilizados na construção dos *Eco-profiles*. Aqui foram retiradas as categorias de IA que são incluídas geralmente nos *Eco-profiles* e, de seguida, analisou-se os *Eco-profiles* de vários tipos de polímeros: os que constituem alguns dos apoios de braço, nomeadamente PET (PlasticsEurope, 2011b), POM (PlasticsEurope, 2014b) e PP (PlasticsEurope, 2014a) e outros que também fazem parte de componentes automóveis (Fernandes, 2015), como o ABS (PlasticsEurope, 2015) e o PC (PlasticsEurope, 2011c).

Tabela 2.2. Categorias de impacte utilizadas nos Eco-profiles da PlasticsEurope.

Categoria de impacte	Unidades	ABS	PC	PET	POM	PP
ADP	kg Sb eq	X	X	X	X	X
AP	g SO ₂ eq	X	X	X	X	X
CC	kg CO ₂ eq	X	X	X	X	X
<i>Dust and particulate matter</i>	g PM ₁₀ eq	X	X	X	X	X
EP	g PO ₄ ³⁻ eq	X	X	X	X	X
ODP	g CFC ⁻¹¹ eq	X	X	X	X	X
POCP	g Ethene eq	X	X	X	X	X
NREU	MJ	X	X	X	X	X
REU	MJ	X	X	X	X	X
<i>Land Use¹</i>	-	-	-	-	-	-

Tendo em conta as categorias apresentadas na Tabela 2.2 e as utilizadas nos estudos analisados, foram selecionados os métodos de cálculo de impactes ambientais que irão ser utilizados para quantificar os impactes ambientais dos modelos de ciclo de vida dos apoios de braço.

2.3.2. Reciclagem

Al-Salem *et al.* (2009) refere que a taxa de produção, consumo e geração de resíduos de plástico tem vindo a aumentar consideravelmente, sendo que, dos plásticos produzidos, 80% corresponde a termoplásticos. Devido ao elevado consumo de recursos para a sua produção e à difícil degradação natural no ambiente, é de extrema importância a gestão e análise dos vários tipos de tratamento de fim de vida destes resíduos, de modo a reduzir as consequências ambientais da sua produção e deposição final.

Os plásticos que constituem os apoios de braço analisados nesta dissertação são termoplásticos. Este tipo de plástico, caracterizado pela sua facilidade de deformação e

¹ Apesar de referida na metodologia e de estar a ser monitorizada pela PlasticsEurope, esta categoria de impacte ainda não está a ser reportada nestes estudos.

endurecimento a altas e baixas temperaturas respetivamente, é facilmente reciclável (Selke, 1994). Assim, considerou-se um cenário de fim de vida em que o apoio de braço irá ser produzido com uma certa percentagem de plástico reciclado. Como tal, foi necessário analisar o tipo de reciclagem a aplicar, definir as fronteiras do sistema de reciclagem e analisar as entradas e saídas do mesmo. De modo a quantificar a redução dos impactes ambientais devido à introdução de material plástico reciclado nos apoios de braço, foi escolhido o apoio de braço que possui melhor desempenho ambiental na fase de produção, o B3. Este apoio de braço, como já foi referido, possui na sua constituição PP GF30.

Os plásticos que são gerados por poliolefinas, como no caso do PP GF30, podem passar por vários tipos de reciclagem, sendo a escolha da metodologia a utilizar dependente do género de produto reciclado final desejado. Al-Salem *et al.* (2009) analisaram os vários tipos de tratamento pelos quais as poliolefinas passam aquando da reciclagem. A Tabela 2.3 resume os tipos de reciclagem estudados, bem como as características dos produtos finais obtidos.

Tabela 2.3. Tipos de reciclagem utilizados para resíduos plásticos (adaptado de Al-Salem *et al.*, 2009).

Tipo de Reciclagem	Descrição	Características do produto final
Primária (re-extrusão)	Reintrodução de fragmentos residuais limpos de um só polímero no ciclo da extrusão	Produção de produtos de matéria similar, aplicado geralmente na unidade fabril onde são gerados os fragmentos.
Secundária (mecânica)	Redução do tamanho de maneira a serem mais convenientes para a função desejada	Produção de paletes, flocos ou pós
Terciária (química)	Tratamentos físico-químicos que alteram a estrutura química do polímero	Matéria-prima para produção de novos petroquímicos ou plásticos
Quaternária (recuperação de energia)	Incineração dos plásticos, aproveitando a elevada capacidade calorífica dos plásticos de um único polímero	Produção de água, dióxido de carbono e energia em forma de calor ou eletricidade

Segundo Pilz *et al.* (2010), que analisou a distribuição de produtos analisados por opção de fim de vida, 8,3% do material processado por reciclagem mecânica provém de componentes automóveis, dos quais 20% são de partes do cockpit constituídas por polipropileno (PP). Em Meran *et al.* (2008), foram analisadas as propriedades mecânicas de

vários plásticos reciclados, comparando-as com as do material virgem, concluindo-se que o PP tem uma capacidade de reciclagem elevada. Desta forma, comparando o PP reciclado, em termos de funcionalidade, com o PP virgem, as diferenças encontradas são pouco significativas, pelo que foi escolhida a reciclagem mecânica como opção viável de fim de vida do PP.

A reciclagem mecânica (ou reciclagem secundária) é um processo de recuperação de resíduos plásticos através de processos mecânicos (Al-Salem et al., 2009). Este tratamento tem a particularidade de que apenas pode processar plásticos de um só polímero, sendo a qualidade do produto final dependente maioritariamente da qualidade do resíduo em termos de contaminação e complexidade do plástico. Na Tabela 2.4 estão explicados os processos que geralmente constituem a reciclagem mecânica.

Tabela 2.4. Processos que ocorrem habitualmente na reciclagem mecânica.

Ordem	Nome do processo	Descrição
1	Redução do tamanho	Corte de grandes quantidades de plástico.
2	Separação de contaminantes	Remoção de impurezas por ciclone.
3	Flutuação	Separação de diferentes tipos de plástico de acordo com a sua densidade, através de um tanque de flutuação.
4	Moagem	Os plásticos constituídos por apenas um tipo de polímero são moídos em conjunto. Geralmente este é o primeiro passo no tratamento secundário em muitas estações de reciclagem.
5	Lavagem e secagem	Esta fase só ocorre quando é necessário continuar o tratamento do plástico. A lavagem é feita geralmente com água.
6	Aglutinação	Recolha e aglomeração do produto para armazenamento.
7	Extrusão	Extrusão do plástico em filamentos e dimensionado em paletes de plástico de um só polímero.
8	Arrefecimento	Arrefecimento do plástico reciclado através de água.

3. APOIO DE BRAÇO: INVENTÁRIO E CONCEÇÕES ALTERNATIVAS

3.1. Aplicação da metodologia ao caso de estudo

No âmbito do Projeto EDIL, foi efetuado uma análise a componentes processados na empresa CIE Plasfil, nomeadamente dois apoios de braço, um composto maioritariamente por aço (apoio de braço B) e um composto maioritariamente por plástico (apoio de braço J), tendo surgido a oportunidade comparar o apoio de braço B com uma solução plástica, através do ecodesign. Para tal, foi efetuado um estudo prévio com o auxílio dos programas Simdesigner e MOLDEX 3D, tendo sido desenvolvidos três novos modelos alternativos ao modelo B, constituídos maioritariamente por plástico: apoios de braço B1; B2 e B3.

Posteriormente, efetuou-se um estudo de ACV comparativo dos cinco modelos referidos, considerando todas as fases de ciclo de vida: produção, utilização e fim de vida. A unidade funcional definida é um apoio de braço como parte integrante de um veículo ligeiro com uma vida útil de 200 000 km. A fase de produção inclui a produção da matéria-prima, o transporte até à CIE Plasfil, os processos decorrentes no interior da unidade fabril, e o transporte até ao recetor final. Na fase de utilização, considerou-se que os apoios de braço fazem parte integrante de um veículo ligeiro com uma vida útil de 200 000 km. Por fim, na fase de fim de vida, considera-se que o material plástico utilizado para fabricar os apoios de braço contém uma percentagem de material reciclado.

Foi feita também uma análise de sensibilidade em três vertentes: na tecnologia de injeção de plástico utilizada, no transporte final dos apoios de braço e na reciclagem do plástico, de modo a compreender a influência destas fases e dos seus respetivos processos no desempenho ambiental do ciclo de vida dos apoios de braço.

Assim, apresentam-se de seguida os fluxos de entrada e saída de material e energia, bem como todos os processos que decorrem na fase de produção dos apoios de braço. Os dados apresentados foram obtidos e calculados através de informação fornecida

pela CIE Plasfil, atualizando assim o estudo prévio efetuado por Fernandes (2015). Dentro desta análise apresentam-se os dados referentes a:

- Extração da matéria-prima;
- Transporte até à unidade fabril da CIE Plasfil;
- Produção dos apoios de braço;
- Transporte até à unidade recetora final.

Relativamente aos dados necessários para quantificar os impactes da extração da matéria-prima, foi utilizada a base de dados Ecoinvent, disponibilizada no programa SimaPro v7.3. Considerou-se para todos os apoios de braço o transporte rodoviário, feito por um camião com carga máxima de 40 t. Devido à falta de dados suficientes para considerar a hipótese do camião voltar com embalagens, considerou-se um retorno vazio do mesmo.

3.2. Apoio de braço B (aço)

O apoio de braço B (Figura 3.1) é um componente constituído por aço e por peças de PP e POM (Poliacetil). Este modelo, antes de chegar à CIE Plasfil, sofre um processo de cataforese, onde a sua peça de aço é revestida com uma camada de pintura (Fernandes, 2015), sendo depois enviada para a CIE Plasfil onde são montadas todas as peças, compondo assim o apoio de braço B. Na Figura 3.2 apresenta-se um fluxograma contendo os fluxos de entrada e saída do ciclo de vida do apoio de braço B.

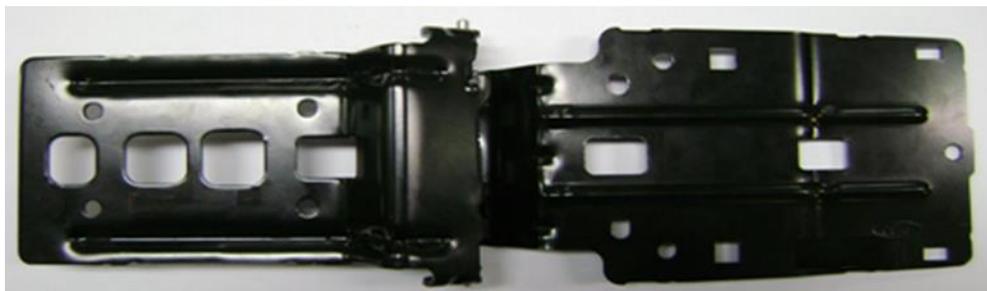


Figura 3.1. Elementos estruturais do apoio de braço B. (Fonte: CIE Plasfil)

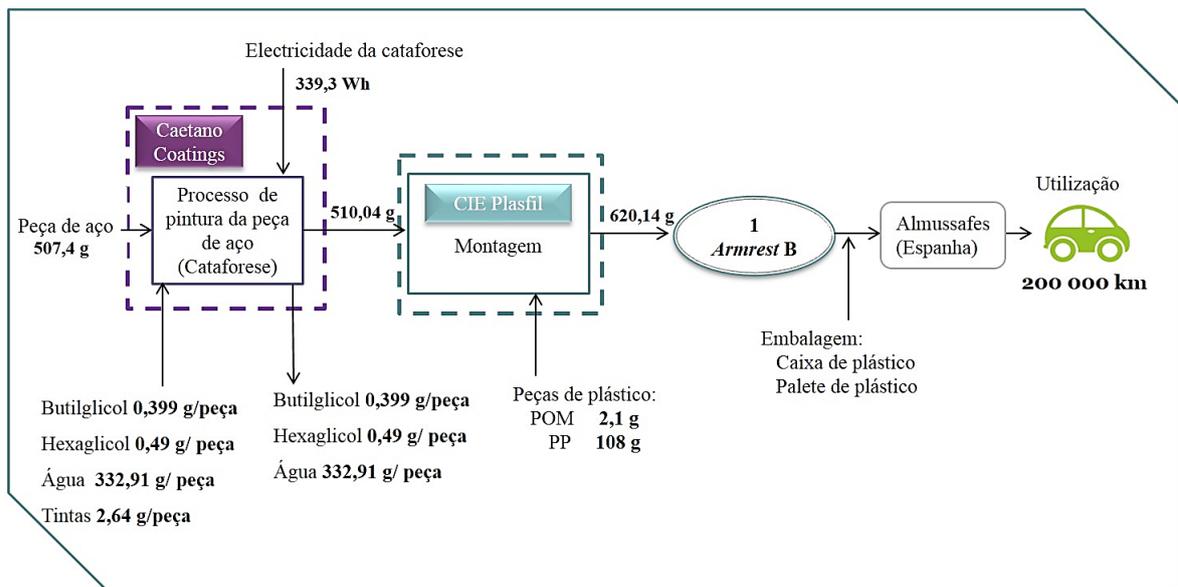


Figura 3.2. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B.

Na Tabela 3.1 apresenta-se o inventário de matéria-prima necessário à produção do apoio de braço B, bem como a distância percorrida pela mesma desde os locais de extração até à CIE Plasfil, enquanto na Tabela 3.2 estão explicitados os fluxos de matéria-prima relativamente ao processo de cataforese, cujo consumo de energia elétrica é de 339,3 Wh por peça de aço incorporada no apoio de braço B.

Tabela 3.1. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B.

Matéria-prima	Peso [g]	Percurso desde a sua extração	Distância [km]
		CIE Udalbide (Espanha)	
Peça de Aço	507,4	Caetano Coatings S.A. (Portugal)	1773
		CIE Plasfil (Portugal)	
		Basel (Espanha)	
PP	108	CIE Plasfil (Portugal)	1106
		Ticona (Alemanha)	
POM	2,1	Augusto Guimarães (Portugal)	2065
		CIE Plasfil (Portugal)	

Tabela 3.2. Fluxo de matéria-prima do processo de cataforese numa peça de aço de um apoio de braço B.

Matéria-prima	Quantidade [g/peça de aço]
Input	
Aço	507,4
Butilglicol	0,399
Hexaglicol	0,49
Água	332,91
Tintas	2,64
Outputs	
Butilglicol	0,399
Hexaglicol	0,49
Água	332,91
Peça de aço	510,04

Na CIE Plasfil, as várias peças são montadas manualmente, i.e., sem consumo energético, formando o apoio de braço B. O fluxo de matéria-prima associado a este processo está descrito na Tabela 3.3. Por fim, o apoio de braço B é transportado até Almussafes, em Espanha. As quantidades expedidas pela CIE Plasfil entre 2011 e 2014 estão indicadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.3. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B.

Matéria-prima	Quantidade [g/armrest B]
Input	
Peça de aço	510,04
PP	108
POM	2,1
Total	620,14
Outputs	
Apoio de braço B	620,14

Tabela 3.4. Quantidade de componentes apoio de braço B expedidos pela CIE Plasfil entre 2011 e 2014.

Unidade recetora	Distância [km]	Quantidade expedida [armrest]
Almussafes (Espanha)	916	428903

A distribuição deste componente é feita por transporte rodoviário (camião com uma carga máxima de 40 toneladas), utilizando caixas de plástico retornáveis de 1,5 kg como embalagens primárias e paletes de plástico retornáveis de 8 kg como embalagens secundárias (ambas constituídas por PP, através do processo *Polypropylene, granulate, at plant/RER U* retirado do Ecoinvent). Foi necessário determinar a fração de utilização (FU) destas

embalagens, de modo a quantificar os impactes ambientais associados à sua utilização. Com os dados referidos na Tabela 3.5 e através das Equações (3.1) e (3.2), determinou-se, respetivamente, a FU da caixa e da palete de plástico que transportam o apoio de braço B até Espanha. O resultado obtido encontra-se na Tabela 3.6.

Tabela 3.5. Características das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço B.

Características	Caixa	Palete
Material constituinte	Plástico	Plástico
Peso [kg]	1,5	8
Caixas transportadas [caixa/palete]	-	70
Peças transportadas	11	770
Vida útil [anos]	10	7
Reutilizações anuais [uso/ano]	8	8

$$FU_{caixa} = \frac{1}{\frac{peça}{uso} \times \frac{uso}{ano} \times n^o \text{ de anos de vida útil}} \quad (3.1)$$

$$FU_{palete} = \frac{1}{\frac{caixa}{uso} \times \frac{peça}{caixa} \times \frac{uso}{ano} \times n^o \text{ anos de vida útil}} \quad (3.2)$$

Tabela 3.6. Fração de utilização das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço B.

Tipo de embalagem	FU
Caixa de plástico	$1,14 \times 10^{-3}$
Palete de plástico	$2,32 \times 10^{-5}$

3.3. Apoio de braço J (plástico)

Na Figura 3.3 apresenta-se o apoio de braço J, composto por dois elementos (charneira e estrutura), moldados no termoplástico PBT PET GF30 através de um processo de injeção (Fernandes, 2015) que ocorre na CIE Plasfil, sendo posteriormente acrescentadas

peças de aço de modo a formar o apoio de braço J. O fluxograma referente ao ciclo de vida deste modelo está representado na Figura 3.4.



Figura 3.3. Elementos estruturais do apoio de braço J. (Fonte: CIE Plasfil)

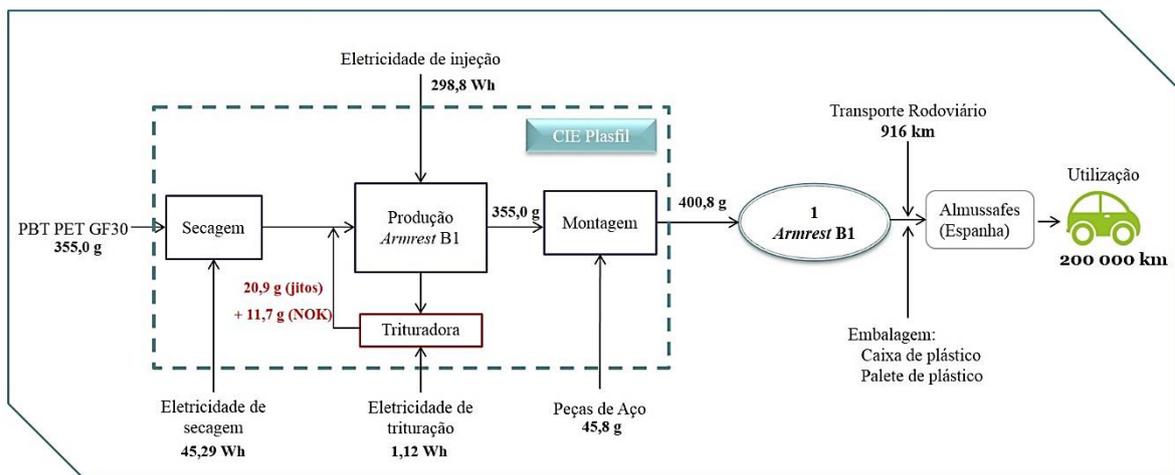


Figura 3.4. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço J.

Como se pode observar na Figura 3.4, o processo de fabrico do apoio de braço J necessita de 393,5 Wh de energia elétrica para produzir as peças de plástico. No entanto a injeção também gera 20,9 g de jitos e 17,6 g de peças rejeitadas por defeitos de processo (NOK). Estas pequenas quantidades de plástico são trituradas e reintegradas no processo de injeção de modo a evitar perdas.

Na Tabela 3.7 apresenta-se a matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço J, bem como a sua origem e distância percorrida até à unidade fabril da CIE Plasfil.

Tabela 3.7. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço J.

Matéria-prima	Peso [g]	Percurso desde a extração	Distância [km]
		Sabic Innovative Plastics (Holanda)	
		↓	
PBT PET GF30	447,0	Augusto Guimarães (Portugal)	2099
		↓	
		CIE Plasfil (Portugal)	
		Luís da Graça (Portugal)	
		↓	
Aço	45,8	CIE Plasfil (Portugal)	204

Nas Tabela 3.8 e Tabela 3.9 apresentam-se respetivamente os fluxos envolvidos na produção do apoio de braço J e a quantidade de componentes expedidas pela CIE Plasfil entre 2011 e 2014 para o seu recetor em Gondecourt (França).

Tabela 3.8. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço J.

Matéria-prima	Quantidade [g/armrest]
Inputs	
PBT PET GF30	447,0
Aço	45,8
Total	492,8
Outputs	
Apoio de braço J	492,8

Tabela 3.9. Quantidade de componentes apoio de braço J expedidos pela CIE Plasfil entre 2011 e 2014.

Unidade recetora	Distância [km]	Quantidades expedidas [armrest]
Gondecourt (França)	1823	107714

Para o transporte do apoio de braço J até ao seu recetor em França, são utilizadas caixas de cartão (processo *Folding boxboard, FBB, at plant/RER U* retirado da Ecoinvent) como embalagem primária e paletes de madeira (processo *EUR-flat pallet/p/RER U* retirado da Ecoinvent) como embalagem secundária, tendo sido também calculadas as suas respetivas frações de utilização FU. Relativamente à caixa de cartão, dado que esta não é retornável, a FU foi calculada através do inverso do número de componentes que esta consegue transportar. Quanto à paleta de madeira, o cálculo foi efetuado através do uso da Equação

(3.2). Os dados referentes a este tipo de embalagens estão expostos na Tabela 3.10, e o valor da FU para a caixa de cartão e para a palete de madeira pode ser observado na Tabela 3.11.

Tabela 3.10. Características das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço J.

Características	Caixa	Palete
Material constituinte	Cartão	Madeira
Peso [kg]	0,3	22
Caixas transportadas [caixa/palete]	-	21
Peças transportadas	8	168
Vida útil [anos]	-	5
Reutilizações anuais [uso/ano]	Não reutilizável	8

Tabela 3.11. Fração de utilização das embalagens utilizadas no transporte do apoio de braço J.

Tipo de embalagem	FU
Caixa de cartão	$1,25 \times 10^{-1}$
Palete de madeira	$1,49 \times 10^{-4}$

3.4. Modelos alternativos

Com vista à minimização de impactes ambientais e à redução de custos relativamente à produção de componentes, a CIE Plasfil conduziu uma análise estrutural e reológica tendo como modelo de partida o apoio de braço J que foi cortado e simplificado para o mesmo tamanho e número de componentes do B de modo a reproduzir o mesmo comportamento do apoio de braço B. Neste estudo foram feitas alterações na geometria (espessura) e no tipo de matéria-prima dos vários modelos analisados, analisando as hipóteses de plásticos a utilizar, resultando em três novos modelos. Definiu-se um modelo inicial, B1, a partir do qual foram feitas alterações de modo a verificar a possibilidade de melhoria relativamente ao peso e ao material a utilizar, surgindo desta análise os modelos B2 e B3.

De modo a se proceder à ACV dos novos modelos, foi necessário partir de alguns pressupostos quanto a certos aspetos dos seus ciclos de vida. No que toca aos consumos energéticos, de modo a produzir os componentes do apoio de braço, segundo a CIE Plasfil, são gastos 0,62 kWh para a produção de 1 kg de PBT PET GF30 de charneira e 0,931 kWh para a mesma quantidade de PBT PET GF30 de estrutura, tendo sido considerado que o valor

não difere significativamente aquando da injeção do PP GF30. Relativamente à quantidade de jitos produzidos aquando do processo de injeção, considerou-se a mesma quantidade que a produzida no caso do apoio de braço J. No caso dos NOK, considerou-se que 1,11 % do peso da charneira e 5,88% do peso da estrutura corresponde à quantidade de NOK gerado devido ao processo de injeção necessário à produção destas duas partes. O tipo de embalagem destes novos modelos, a unidade recetora e as quantidades que esta adquiriu entre os anos de 2011 e 2014 foram consideradas idênticas às do apoio de braço B.

3.4.1. Apoio de braço B1

O fluxograma referente ao ciclo de vida do apoio de braço B1, composto por PBT PET GF30 e aço, encontra-se na Figura 3.5. A eletricidade de injeção necessária corresponde a 298,8 Wh, produzindo este processo 20,9 g de jitos (ou seja, equivalente à quantidade produzida pelo apoio de braço J) e 11,7 g de NOK.

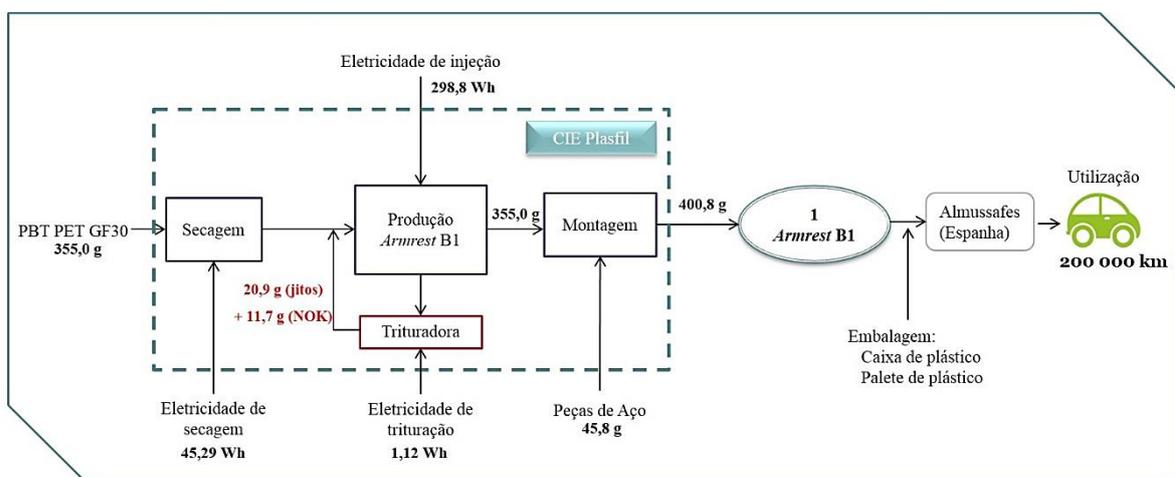


Figura 3.5. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B1.

Na Tabela 3.12 apresentam-se as quantidades de matéria-prima necessária à produção do apoio de braço B1, bem como a distância percorrida pelas mesmas até chegarem à CIE Plasfil. Na Tabela 3.13, observa-se o fluxo de entradas e saídas aquando do fabrico do componente.

Tabela 3.12. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B1.

Matéria-prima	Peso [g]	Percurso desde a sua extração	Distância [km]
Sabic Innovative Plastics (Holanda)			
PBT PET GF30	355,0	Augusto Guimarães (Portugal)	2099
CIE Plasfil (Portugal)			
Aço	45,8	Luís da Graça (Portugal)	204
CIE Plasfil (Portugal)			

Tabela 3.13. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B1.

Matéria-prima	Quantidade [g/armrest]
Inputs	
PBT PET GF30	355,0
Aço	45,8
Total	400,8
Outputs	
Apoio de braço B1	400,8

3.4.2. Apoio de braço B2

O apoio de braço B2 foi alcançado a partir do inicial B1, através da redução da espessura da estrutura, obtendo-se assim um apoio de braço mais leve. Os respetivos fluxos de matéria-prima e de energia no ciclo de vida podem ser observados no fluxograma da Figura 3.6.

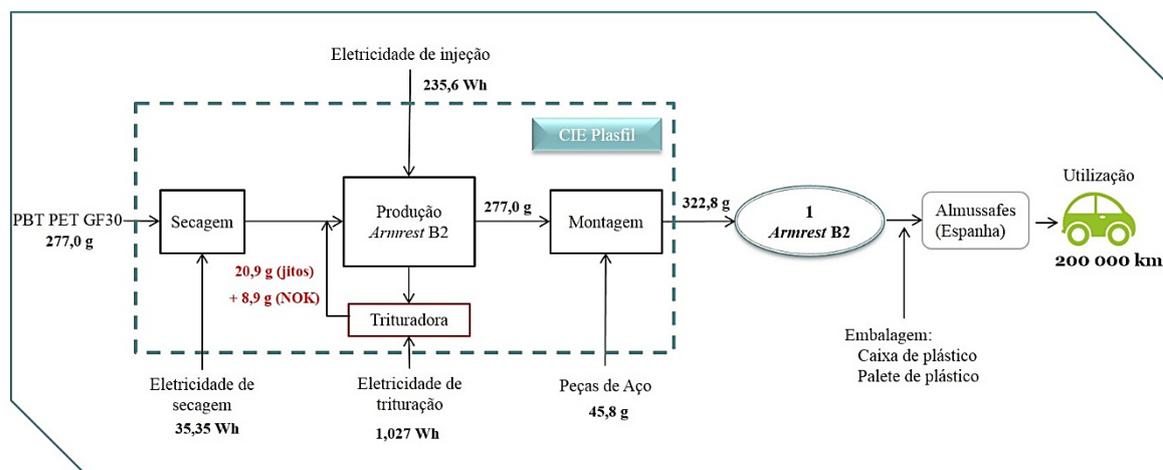


Figura 3.6. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B2.

As matérias-primas e respetivas quantidades, bem como a distância percorrida até à unidade fabril da CIE Plasfil, encontram-se na Tabela 3.14. Na Tabela 3.15 apresenta-se o fluxo de matéria necessária à produção do apoio de braço B2.

Tabela 3.14. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B2.

Matéria-prima	Peso [g]	Percorso desde a sua extração	Distância [km]
		Sabic Innovative Plastics (Holanda)	
		↓	
PBT PET GF30	277,0	Augusto Guimarães (Portugal)	2099
		↓	
		CIE Plasfil (Portugal)	
		Luís da Graça (Portugal)	
Aço	45,8	↓	204
		CIE Plasfil (Portugal)	

Tabela 3.15. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B2.

Matéria-prima	Quantidade [g/armrest]
Inputs	
PBT PET GF30	277,0
Aço	45,8
Total	322,8
Outputs	
Apoio de braço B2	322,8

3.4.3. Apoio de braço B3

O modelo B3 resultou da redução da espessura da charneira do modelo B1 de 3 para 1,5 mm e da substituição do PBT PET GF30 por PP GF30 tanto na charneira como na estrutura, conduzindo a uma redução de cerca de 120 g. Na Figura 3.7 observa-se o fluxograma do ciclo de vida do apoio de braço B3.

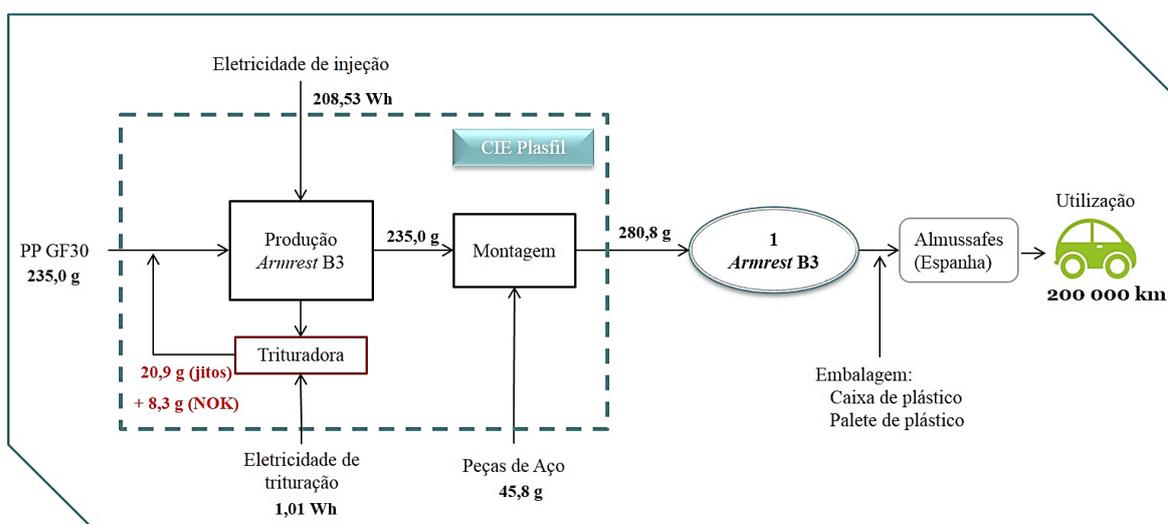


Figura 3.7. Fluxograma do ciclo de vida de um apoio de braço B3.

É de notar que a matéria-prima do apoio de braço B3 (PP GF30) não passa pelo processo de secagem como o PBT PET GF30, sendo diretamente encaminhada para o processo de injeção. Na Tabela 3.16 indica-se a matéria-prima necessária à produção do modelo B3, bem como a distância percorrida até à CIE Plasfil. Na Tabela 3.17 explicita-se o fluxo de matéria-prima do seu processo de fabrico.

Tabela 3.16. Inventário da matéria-prima necessária à produção de um apoio de braço B3.

Matéria-prima	Peso [g]	Percurso desde a sua extração	Distância [km]
PP GF30	235,0	Taroplast (Itália) ↓ CIE Plasfil (Portugal)	2065
Aço	45,8	Luís da Graça (Portugal) ↓ CIE Plasfil (Portugal)	204

Tabela 3.17. Fluxo de matéria-prima associado à montagem de um apoio de braço B3.

Matéria-prima	Quantidade [g/armrest]
Inputs	
PP GF30	235,0
Aço	45,8
Total	280,8
Outputs	
Apoio de braço B3	280,8

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos relativamente aos impactes ambientais que decorrem nas várias fases de ciclo de vida dos apoios de braço.

Os métodos de cálculo de impactes ambientais seleccionados foram:

- ReCiPe (indicador *Midpoint* (na perspetiva H (Hierárquico) - Europe (H) v1.07) com as seguintes categorias de impacte ambiental:
 - Alterações climáticas (CC);
 - Depleção da camada de ozono (ODP);
 - Acidificação (AP);
 - Eutrofização da água doce;
 - Eutrofização marinha;
 - Oxidação fotoquímica (POCP);
 - Emissão de partículas.
- CML 2001 (v2.05 / *World*, 1995), de modo a complementar as categorias de impacte ambiental seleccionadas, com:
 - Depleção abiótica (ADP).
- CED v1.08, completando assim a lista das categorias escolhidas com:
 - Energia primária de recursos não renováveis (NREU);

No Apêndice A apresenta-se uma breve descrição das várias categorias de impacte seleccionadas. De modo a quantificar os impactes ambientais relativos ao consumo de energia eléctrica, considerou-se o *mix* energético de Portugal de 2012. O programa escolhido para a quantificação dos impactes associados ao ciclo de vida dos apoios de braço foi o SimaPro v7.3.

4.1. Cenário Base

Nesta secção apresentam-se os resultados para cada uma das fases de ciclo de vida dos apoios de braço analisados. Inicialmente são apresentados os resultados das

categorias de impacto ambiental relativamente à fase de produção dos apoios de braço e, por fim, são apresentados os resultados finais de ciclo de vida dos componentes.

Os resultados apresentados não incluem os processos de fabrico de infraestruturas e de emissões de longo prazo (Johansson *et al.*, 2000; Le Borgne e Feillard, 2001; Shonfield, 2008). É de notar que, devido a não haver dados relativos ao plástico POM na base de dados Ecoinvent, este plástico foi substituído por PP nos cálculos, tendo sido assumido que o processo relativo ao PP produz resultados cuja diferença relativamente aos impactos da produção de POM é desprezável, também devido ao peso relativo do POM, que é bastante reduzido (0,3%). Assume-se assim, para efeitos de cálculo de resultados, que o apoio de braço B é constituído na prática apenas por aço e PP.

4.1.1. Fase de produção

Através dos dados do ICV, procedeu-se à quantificação dos impactos ambientais. Esta secção apresenta os impactos (Figura 4.1) que são gerados na fase de produção, discriminando todos os processos envolvidos, desde a extração da matéria-prima, transporte e produção dos apoios de braço (para mais detalhes ver o Apêndice B). Observa-se que os impactos ambientais se devem sobretudo ao fabrico das matérias-primas, sendo que estas têm um peso, em média, entre 65 e 87% dos impactos totais da produção dos apoios de braço nas categorias analisadas. Na maioria das categorias, o apoio de braço J, apesar de não ser o apoio de braço mais pesado, é o que tem pior desempenho ambiental de entre os apoios de braço analisados, excetuando as categorias de Eutrofização da água doce e Emissão de partículas. Este desempenho deve-se à produção da matéria-prima, com uma variação de 62 a 85% no peso relativo aos impactos totais nas categorias analisadas. Na categoria de Depleção da camada de ozono, verifica-se que o apoio de braço B1 gera mais impactos ambientais que o apoio de braço B. Este resultado vem reforçar a necessidade de efetuar um estudo de ecodesign numa perspetiva de ciclo de vida, pois o peso não é o único fator determinante no desempenho ambiental de um componente automóvel em todas as fases do ciclo de vida.



Figura 4.1. Fase de produção dos apoios de braço: comparação do desempenho ambiental através dos métodos ReCiPe, CML e CED. Categorias: a) Alterações climáticas; b) Depleção da camada de ozono; c) Acidificação; d) Eutrofização da água doce; e) Eutrofização marinha; f) Oxidação fotoquímica; g) Emissão de partículas; h) Depleção abiótica; i) Energia primária de recursos não renováveis.

Verifica-se também que dos modelos analisados, o apoio de braço B3 possui o melhor desempenho ambiental em todas as categorias de impacto ambiental, variando a sua redução em relação aos restantes em cada categoria. Na categoria de Emissão de partículas, o apoio de braço B3 verifica um impacto total de $1,19 \times 10^{-3}$ kg PM₁₀ eq/apoio de braço, o que corresponde a uma melhoria de 69% em relação ao apoio de braço B, que apresenta nesta categoria um total de $3,82 \times 10^{-3}$ kg PM₁₀ eq/apoio de braço. De modo a compreender a variação da melhoria dos modelos alternativos relativamente aos apoios de braço B e J, recomenda-se a observação da Tabela 4.1, que apresenta as emissões totais por apoio de braço em cada categoria, bem como a respetiva redução em relação aos apoios de braço B e J. As células destacadas a cinzento representam os melhores resultados a nível da redução.

Relativamente à fase de Transporte, esta possui maior relevância nas categorias de Depleção da camada de ozono (peso médio de 24%) e Eutrofização marinha (19%). As embalagens dos apoios de braço têm uma maior contribuição média na categoria de Alterações climáticas devido ao fabrico do PP, com um peso médio de 0,9% nos impactos totais da fase de produção, principalmente no apoio de braço B2, onde estas apresentam um impacto total de $3,73 \times 10^{-3}$ kg CO₂ eq/apoio de braço (1,9% do valor total).

Quanto aos processos realizados dentro da unidade fabril da CIE Plasfil (secagem do PBT PET GF30, injeção e trituração), estes processos têm um aumento na sua significância na categoria de Eutrofização de água doce, devido à libertação de fosfatos na queima de carvão para a produção de eletricidade. A secagem e a trituração têm um peso médio relativamente baixo, cujos valores são de 3% e 0,1%, respetivamente. Em relação à injeção, nesta categoria de impacto, possui uma relevância de 17%, devido à emissão de fosfatos na queima de carvão para a produção de eletricidade, o que é um valor bastante significativo, dado que nas restantes categorias o seu peso ronda entre 6% (Energia primária de recursos não renováveis) e 15% (Acidificação, devido a emissões de SO₂ na queima de combustível petrolífero para a produção de eletricidade) dos impactos totais da fase de produção dos apoios de braço, devido aos impactos gerados pelas misturas de cinzas de madeira em terrenos agrícolas e pelo consumo de carvão e consequentes resíduos.

Tabela 4.1. Avaliação ambiental total comparativa por apoio de braço da fase de produção e redução dos impactes em relação aos apoios de braço B e J. Os valores negativos correspondem a um aumento dos impactes ambientais. N/A – Comparação não aplicável.

Categoria de impacte	Unidade	B (aço)	J (plástico)	B1	B2	B3
Alterações climáticas	kg CO ₂ eq	1,38	1,63	1,26	1,01	0,77
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	-18%	9%	27%	44%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	16%	N/A	23%	38%	53%
Depleção da camada de ozono	kg CFC ⁻¹¹ eq	6,59E-08	1,11E-07	8,22E-08	6,60E-08	3,71E-08
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	-68%	-25%	0%	44%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	41%	N/A	26%	41%	67%
Acidificação	kg SO ₂ eq	5,16E-03	6,57E-03	5,02E-03	4,02E-03	3,07E-03
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	-27%	3%	22%	40%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	21%	N/A	24%	39%	53%
Eutrofização da água doce	kg P eq	8,07E-05	5,29E-05	4,24E-05	3,46E-05	2,64E-05
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	34%	48%	57%	67%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	-52%	N/A	20%	35%	50%
Eutrofização marinha	kg N eq	1,65E-04	1,89E-04	1,42E-04	1,15E-04	9,93E-05
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	-15%	14%	30%	40%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	13%	N/A	25%	39%	47%
Oxidação fotoquímica	kg NMVOC	5,16E-03	5,63E-03	4,23E-03	3,41E-03	3,04E-03
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	-9%	18%	34%	41%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	8%	N/A	25%	40%	46%
Emissão de partículas	kg PM ₁₀ eq	3,82E-03	2,40E-03	1,87E-03	1,54E-03	1,23E-03
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	37%	51%	60%	68%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	-59%	N/A	22%	36%	49%
Depleção abiótica	kg Sb eq	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	-25%	2%	22%	34%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	20%	N/A	22%	38%	47%
Energia primária de recursos não renováveis	MJ _P	25,65	36,01	28,10	22,33	19,10
Redução vs. <i>Armrest B</i>	[%]	N/A	-40%	-10%	13%	26%
Redução vs. <i>Armrest J</i>	[%]	29%	N/A	22%	38%	47%

4.1.2. Ciclo de vida

Nesta secção apresentam-se os impactes de ciclo de vida dos apoios de braço como componentes automóveis de um veículo com uma vida útil de 200 000 km. Realizou-se uma análise de sensibilidade relativamente ao quilómetro percorrido na vida útil do veículo, de 100 000 km a 300 000 km. De modo a determinar o consumo de combustível associado a cada apoio de braço, foi utilizada a Equação (4.1) (Ribeiro *et al.*, 2007). O significado e valor utilizado em cada parâmetro está indicado na Tabela 4.2. Com esses valores e os pesos respetivos de cada apoio de braço, determinou-se o consumo associado à utilização dos mesmos como componentes automóveis. Com base no consumo obtido, em termos de gasolina, determinaram-se os impactes ambientais em cada uma das nove categorias analisadas e para as três distâncias percorridas na vida útil do veículo. Os resultados referentes apenas à fase de utilização apresentam-se no Apêndice C.

$$F_{Comp.} = C_{ref,veh} \times (M_{comp}/M_{ref,veh}) \times c \times D \quad (4.1)$$

$$[kg] = \frac{[kg]}{[km]} \times \frac{[kg]}{[kg]} \times [km]$$

Tabela 4.2. Parâmetros analisados e valores atribuídos. Os valores utilizados foram retirados de Ferreira *et al.* (2013).

Parâmetro	Descrição	Valor
$F_{Comp.}$ [kg]	Consumo de combustível associado ao componente ao longo da vida total do veículo.	Valor a obter.
$C_{ref,veh}$ [kg/km]	Consumo de combustível do veículo de referência.	0,0587
M_{comp} [kg]	Massa do componente.	Peso dos <i>armrest</i> .
$M_{ref,veh}$ [kg]	Massa do veículo de referência.	1080
c	Coeficiente de massa-combustível, ou seja, a correlação entre o consumo de combustível e o peso do veículo.	0,6
D [km]	Distância percorrida no ciclo de vida.	100 000 200 000 (base) 300 000

Na Figura 4.2 apresenta-se um exemplo desses resultados, contendo as emissões da categoria de Alterações climáticas por quilómetro percorrido, para cada um dos apoios de braço. Verifica-se que, apesar de o apoio de braço J apresentar ao quilómetro zero um maior impacte ambiental que o apoio de braço B, após o início da utilização o apoio de braço B origina um maior impacte por quilómetro percorrido, ou seja, a sua reta possui um maior declive que a reta do apoio de braço J, acabando por superá-lo ao longo da utilização. O ponto a partir do qual esta transição ocorre denomina-se *ponto de indiferença* ou *ponto de equilíbrio* e traduz-se visualmente numa interseção das retas correspondentes aos impactes do apoio de braço B e J (ilustrado na Figura 4.3). Estes pontos de indiferença ocorrem na maioria das categorias de impacte ambiental (excetuando a Eutrofização de água doce e a Emissão de partículas), entre alguns dos apoios de braço. Na Tabela 4.3 pode-se observar todos os pontos de indiferença existentes nos resultados.

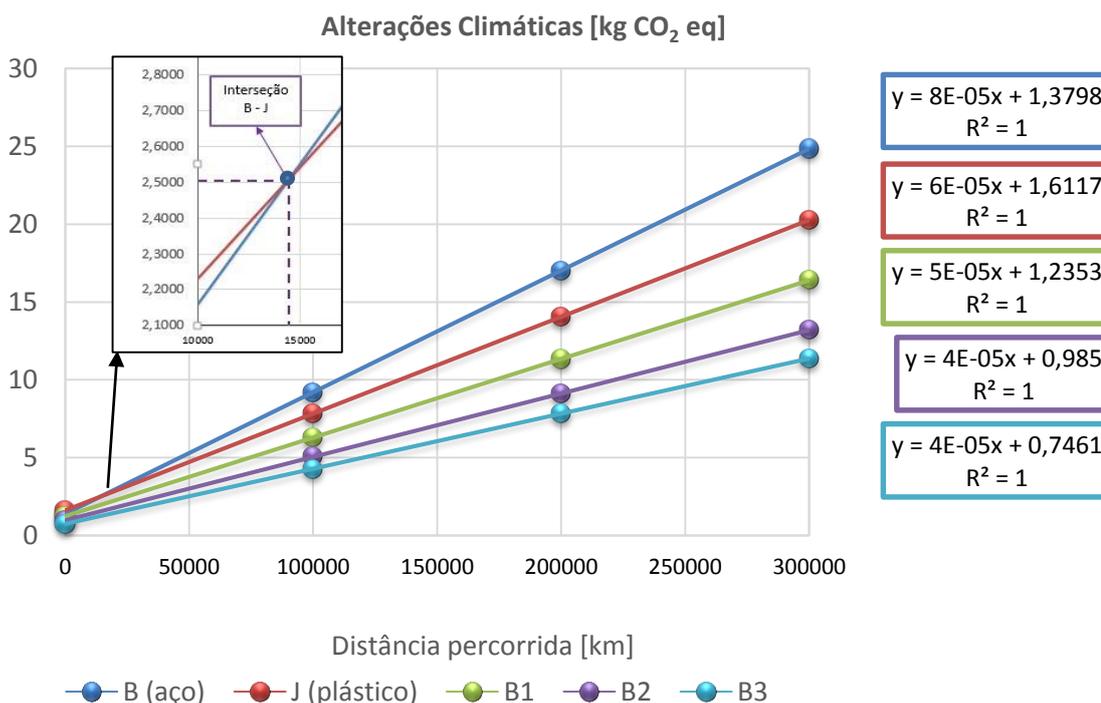


Figura 4.2. Comparação (Alterações climáticas) em função da distância percorrida pelo veículo (vida útil) por apoio de braço.

Na Tabela 4.3, como constatado nos resultados da fase de produção, os apoios de braço B e J têm vários pontos de indiferença devido ao apoio de braço J possuir um maior impacte ambiental ao quilómetro zero devido aos maiores impactes na fase de produção.

Como o consumo de combustível associado a um componente automóvel aumenta com o seu peso, os impactes gerados por quilómetro percorrido no caso do apoio de braço B são mais elevados relativamente ao apoio de braço J.

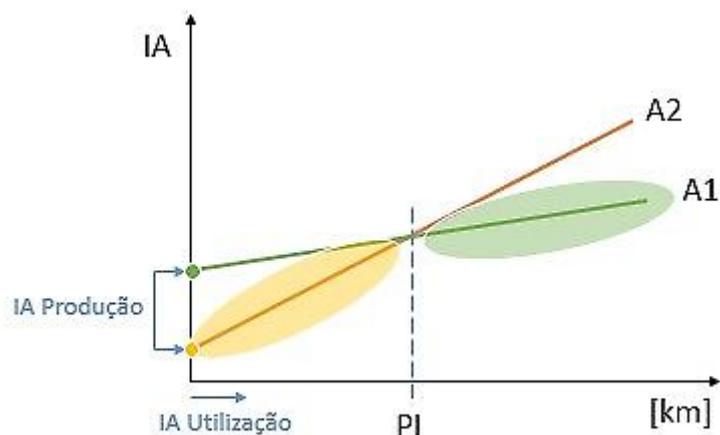


Figura 4.3. Ilustração do ponto de indiferença, a partir do qual um apoio de braço 2 passa a possuir maiores impactes ambientais que um apoio de braço 1.

Tabela 4.3. Pontos de indiferença por apoio de braço existentes nas categorias de impacte ambiental analisadas. A coluna PI indica o quilómetro onde ocorre o ponto de indiferença, a partir do qual o apoio de braço na coluna final passa a possuir mais impactes ambientais que o referido na segunda coluna.

Categoria		< PI [km]	<
Depleção da camada de ozono [kg CFC ⁻¹¹ eq]	B1	3964	B
Energia primária de recursos não renováveis [MJ _P]	B1	5375	B
Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	J	10394	B
Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	J	14435	B
Depleção da camada de ozono [kg CFC ⁻¹¹ eq]	J	18990	B
Eutrofização marinha [kg N eq]	J	27193	B
Depleção abiótica [kg Sb eq]	J	30716	B
Energia primária de recursos não renováveis [MJ _P]	J	42973	B
Acidificação [kg SO ₂ eq]	J	43713	B

Na Figura 4.4 apresentam-se os resultados finais para o ciclo de vida dos apoios de braço, considerando uma vida útil de 200 000 km, observando-se o peso relativo de cada fase no ciclo de vida total de cada modelo (para mais detalhe consultar o Apêndice D).



Figura 4.4. Ciclo de vida dos apoios de braço: comparação do desempenho ambiental através dos métodos ReCiPe, CML e CED. Categorias: a) Alterações climáticas; b) Depleção da camada de ozono; c) Acidificação; d) Eutrofização da água doce; e) Eutrofização marinha; f) Oxidação fotoquímica; g) Emissão de partículas; a) Depleção abiótica; b) Energia primária de recursos não renováveis.

Considerou-se que a fase de produção envolve todos os processos envolvidos desde a extração de matéria-prima até ao material de embalagem utilizado em cada apoio de braço; a fase de transporte engloba o transporte inicial da matéria-prima até à CIE Plasfil e o transporte dos componentes até ao seu recetor final e a fase de utilização engloba os impactes gerados pelo consumo de combustível associado ao peso de cada apoio de braço incorporado no veículo. Consta-se que a maioria dos impactes ambientais decorre na fase de utilização, possuindo esta um peso médio entre 76 e 95%, excetuando a categoria de Eutrofização de água doce, onde esta fase tem um peso de 33%, devido às elevadas emissões de fosfato na produção de eletricidade para o fabrico do aço na fase de produção. Relativamente à fase de transporte, esta apresenta-se com relevância baixa para os impactes ambientais totais de ciclo de vida. Aqui o seu maior contributo é na categoria Eutrofização marinha com um peso médio, para todos os apoios de braço, de 4%. Verifica-se que no apoio de braço J, nesta categoria, o transporte contribui com aproximadamente 5% ($3,84 \times 10^{-5}$ kg N eq/apoio de braço) para os impactes totais de $7,10 \times 10^{-4}$ kg N eq/apoio de braço.

Similarmente à fase de produção, também no ciclo de vida se verifica que os novos modelos B1, B2 e B3 apresentam um desempenho ambiental superior relativamente aos apoios de braço B e J, diminuindo gradualmente os impactes ambientais de ciclo de vida do apoio de braço B1 ao B3, apresentando este último novamente o melhor desempenho ambiental em todas as categorias analisadas.

Com estes resultados pode concluir-se que um estudo centrado apenas na fase de produção pode gerar resultados distintos de um estudo que considera todas as fases de ciclo de vida. Daí ser imprescindível a conjugação do ecodesign com a metodologia da ACV.

4.2. Cenários alternativos

Por forma a avaliar as implicações de determinadas características e processos no ciclo de vida dos apoios de braço, apresenta-se nesta secção uma análise de sensibilidade relativamente aos seguintes aspetos:

- Tipo de tecnologia de injeção utilizada: substituição das máquinas injetoras hidráulicas por máquinas 100% elétricas;
- Transporte: análise à alteração dos destinos finais dos apoios de braço e do tipo de transporte utilizado;
- Fim de vida: estudo da hipótese da incorporação de material reciclado na matéria-prima que compõe os apoios de braço, comparando diferentes percentagens e diferentes origens de plástico reciclado.

4.2.1. Máquinas de injeção hidráulica vs. Máquinas elétricas

Com o intuito de aumentar a competitividade da empresa através da redução de consumos e consequentes custos, a CIE Plasfil analisou um estudo de comparação a nível do consumo energético, entre duas máquinas de injeção, uma hidráulica e uma elétrica, com ciclos de produção equivalentes. Neste estudo, efetuado para máquinas nas gamas de 100-130 e 200 toneladas (força de fecho), verificou-se que há uma poupança significativa aquando da substituição da máquina hidráulica pela máquina elétrica (Tabela 4.4).

Tabela 4.4. Comparação entre uma máquina hidráulica e uma máquina elétrica relativamente à potência média absorvida (Fonte: CIE Plasfil).

Gama	Potência da máquina hidráulica [kW]	Potência da máquina elétrica [kW]	Poupança
100-130 t	17,9	7	61%
200 t	16	6,6	59%

Verifica-se que a poupança em ambas as gamas é muito similar, tendo por isso sido utilizado um valor médio de poupança de consumo de 60% nos cálculos referentes aos consumos associados ao processo de injeção (Tabela 4.5).

Tabela 4.5. Comparação dos consumos de energia associados à produção dos apoios de braço plásticos entre máquinas hidráulicas e máquinas elétricas.

<i>Armrest</i>	Consumo de injeção [Wh]	
	Máquina hidráulica (Cenário Base)	Máquina elétrica
J	393,5	158,1
B1	298,8	120,1
B2	235,6	94,7
B3	208,5	83,8

Procedeu-se, na Tabela 4.6, à análise e comparação dos resultados obtidos com a injeção por máquina elétrica com os resultados do cenário base (máquina hidráulica). Os valores entre parêntesis na Tabela 4.6 correspondem ao peso percentual do processo de injeção relativamente ao impacte total do apoio de braço e a linha “Redução” corresponde à redução dos impactes totais da fase de produção relativamente ao cenário base. Verifica-se que há uma melhoria relativamente ao desempenho ambiental do processo de injeção em todas as categorias de impacte ambiental e, como tal, o peso do processo de injeção numa perspetiva global da fase de produção vai diminuindo. Entre os apoios de braço J, B1 e B2 nota-se uma redução do peso do processo de injeção em relação aos impactes totais (e consequentemente, na melhoria obtida com o cenário alternativo), com a redução do peso plástico dos apoios de braço, devido à diminuição da quantidade de plástico que é injetada. Tal não acontece no apoio de braço B3, apesar de este ser o mais leve. Ao contrário dos outros casos, no apoio de braço B3 a maioria do peso plástico reside na componente da estrutura, que requer um valor energético superior para a injeção relativamente à componente da charneira. Dado o maior peso do processo de injeção nos impactes totais em ambos os cenários, o mesmo acontece com a redução aquando da substituição por uma máquina elétrica. O apoio de braço B3 é, assim, o apoio de braço com melhor desempenho ambiental neste cenário.

A maior percentagem de redução dos impactes ambientais ocorre naturalmente nas categorias de impacte onde o processo de injeção tem um peso relativo superior em relação aos impactes totais da fase de produção (secção 4.1.1). Conforme se verificou na análise aos resultados da fase de produção, o processo de injeção tem uma maior relevância

na categoria de Eutrofização da água doce, sendo a percentagem média de redução nesta categoria de 11%.

Tabela 4.6. Comparação dos resultados entre o cenário base e o cenário alternativo da máquina elétrica.

Categoria de impacte	Processo de injeção	J (plástico)	B1	B2	B3
Alterações climáticas [kg CO₂ eq]	Máquina hidráulica	1,81E-01 (11,2%)	1,25E-01 (9,9%)	9,66E-02 (9,6%)	8,43E-02 (11%)
	Máquina elétrica	7,28E-02 (4,84%)	5,00E-02 (4,31%)	3,88E-02 (4,18%)	3,39E-02 (4,87%)
	Redução	6,73%	6,03%	5,86%	6,76%
Depleção da camada de ozono [kg CFC⁻¹¹ eq]	Máquina hidráulica	8,80E-09 (8,14%)	6,05E-09 (7,61%)	4,69E-09 (7,40%)	4,09E-09 (11,85%)
	Máquina elétrica	3,54E-09 (3,44%)	2,43E-09 (3,20%)	1,88E-09 (3,11%)	1,65E-09 (5,12%)
	Redução	4,87%	4,55%	4,43%	7,09%
Acidificação [kg SO₂ eq]	Máquina hidráulica	1,05E-03 (16,13%)	7,19E-04 (14,62%)	5,57E-04 (14,25%)	4,86E-04 (16,39%)
	Máquina elétrica	4,20E-04 (7,17%)	2,89E-04 (6,44%)	2,24E-04 (6,26%)	1,95E-04 (7,30%)
	Redução	9,65%	8,75%	8,52%	9,81%
Eutrofização da água doce [kg P eq]	Máquina hidráulica	1,02E-05 (19,41%)	7,02E-06 (17,02%)	5,44E-06 (16,25%)	4,75E-06 (18,80%)
	Máquina elétrica	4,10E-06 (8,82%)	2,82E-06 (7,61%)	2,19E-06 (7,23%)	1,91E-06 (8,51%)
	Redução	11,61%	10,18%	9,72%	11,24%
Eutrofização marinha [kg N eq]	Máquina hidráulica	2,19E-05 (11,95%)	1,50E-05 (11,36%)	1,17E-05 (11,02%)	1,02E-05 (11,34%)
	Máquina elétrica	8,80E-06 (5,17%)	6,05E-06 (4,90%)	4,69E-06 (4,74%)	4,09E-06 (4,89%)
	Redução	7,15%	6,80%	6,59%	6,78%
Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	Máquina hidráulica	5,91E-04 (10,72%)	4,06E-04 (9,83%)	3,15E-04 (9,52%)	2,75E-04 (9,35%)
	Máquina elétrica	2,37E-04 (4,60%)	1,63E-04 (4,19%)	1,26E-04 (4,05%)	1,10E-04 (3,98%)
	Redução	6,41%	5,88%	5,69%	5,59%
Emissão de partículas [kg PM₁₀ eq]	Máquina hidráulica	3,30E-04 (13,94%)	2,27E-04 (12,38%)	1,76E-04 (11,75%)	1,53E-04 (12,91%)
	Máquina elétrica	1,33E-04 (6,11%)	9,11E-05 (5,37%)	7,07E-05 (5,08%)	6,17E-05 (5,62%)
	Redução	8,34%	7,41%	7,03%	7,72%
Depleção abiótica [kg Sb eq]	Máquina hidráulica	1,34E-03 (8,25%)	9,20E-04 (7,28%)	7,13E-04 (7,11%)	6,22E-04 (7,36%)
	Máquina elétrica	5,37E-04 (3,49%)	3,69E-04 (3,06%)	2,86E-04 (2,98%)	2,50E-04 (3,09%)
	Redução	4,94%	4,36%	4,25%	4,40%
Energia primária de recursos não renováveis [MJ_P]	Máquina hidráulica	2,28E+00 (6,40%)	1,57E+00 (5,65%)	1,22E+00 (5,52%)	1,06E+00 (5,65%)
	Máquina elétrica	9,17E-01 (2,67%)	6,31E-01 (2,35%)	4,89E-01 (2,29%)	4,27E-01 (2,35%)
	Redução	3,83%	3,38%	3,30%	3,38%

4.2.2. Transporte: Destinos finais e Tipo de transporte

Nesta secção, avaliam-se diversas hipóteses relativamente aos possíveis destinos dos apoios de braço e aos modos de transporte considerados. Relativamente ao transporte da matéria-prima para a CIE Plasfil, consideraram-se as mesmas distâncias e tipo de transporte utilizados no cenário base. Relativamente aos apoios de braço produzidos, fez-se uma análise aos destinos e tipos de transporte utilizados até ao recetor final (Tabela 4.7).

Tabela 4.7. Cenários considerados para a análise de sensibilidade à fase de Transporte.

Cenários Alternativos	Destino final	Distância [km]	Tipo de transporte
D1	Média ponderada	1392	Rodoviário
D2	Gondecourt (França)	1823	Rodoviário
D3	Mielec (Polónia)	3252	Rodoviário
T1	Mielec (Polónia) (Safaei <i>et al.</i> , 2015)	3242 (Marítimo)	Marítimo
		+ 624 (Rodoviário)	+ Rodoviário
T2	Buenos Aires (Argentina)	9720	Marítimo

A comparar com o Cenário Base (apoio de braço B3), onde o destino final é Almussafes (Espanha) com uma distância de 916 km.

Os destinos finais selecionados foram escolhidos de entre vários destinos para os quais a CIE Plasfil envia os seus componentes. O destino “Média ponderada” é, tal como o nome indica, um destino hipotético, cuja distância advém da média ponderada de todos os destinos com origem na CIE Plasfil. Analisou-se também o destino Gondecourt, pois este é, geralmente, um ponto de passagem inicial, a partir do qual os componentes são enviados para diversos OEMs (*Original Equipment Manufacturer*). Relativamente ao destino de Mielec, este foi selecionado de modo a complementar informação disponibilizada em Safaei *et al.* (2015). Finalmente, foi também estudado o destino Buenos Aires pois, para além de ser o destino mais longínquo, é também servido por via marítima. Na Tabela 4.8 apresentam-se os resultados relativos a cada um dos cenários estudados para o apoio de braço B3 (o modelo com melhor desempenho ambiental na análise de ciclo de vida do cenário base), com o valor do impacte do transporte, o valor do impacte total da fase de produção (*cradle-to-gate*) e a redução dos impactes totais dos cenários alternativos de transporte em relação aos impactes totais do cenário base. Valores negativos de redução significam que, ao invés de

haver uma redução de impactes, ocorre um aumento dos mesmos. De modo a facilitar a análise dos resultados, os valores da redução com maior significância (positivos ou negativos) encontram-se sombreados a cinzento.

Verifica-se um aumento dos impactes nos cenários D, pois a distância percorrida no cenário base é inferior à dos cenários alternativos. Apesar do aumento dos impactes de transporte poder ultrapassar 200% (cenário D3, devido a ter a maior distância percorrida de entre os cenários D), a variação dos impactes na fase de produção não ultrapassa 35%. Isto ocorre porque, conforme referido na análise aos resultados da fase de produção (secção 4.1.1), a fase de transporte tem um peso pouco significativo relativamente ao total da fase de produção na maioria das categorias de impacte ambiental. A variação é maior nas categorias onde a fase de transporte possui maior relevância, isto é, nas categorias de Depleção da camada de ozono e de Eutrofização marinha.

Para os cenários T, a redução dos impactes na fase de transporte não ocorre linearmente, pois a variação relativamente ao cenário base ocorre quer a nível de distância percorrida, quer a nível do tipo de transporte utilizado. No cenário T1, a categoria com maior aumento é a Acidificação: mais 169% relativamente ao transporte do cenário base, o que corresponde a um aumento de 8% nos impactes totais da fase de produção. Também as categorias de Emissão de partículas e Eutrofização marinha conduzem a incrementos de, respetivamente, 5,7% e 5,2% (devido às emissões de partículas e de azoto pelo navio, respetivamente) nos impactes totais da fase de produção. De notar que o cenário T1 difere do cenário D3 apenas no tipo de transporte, recorrendo o primeiro ao transporte combinado marítimo/rodoviário e o segundo exclusivamente ao transporte rodoviário. Verifica-se que o cenário T1 apresenta menores impactes ambientais que o cenário D3 em todas as categorias de impacte ambiental, comprovando assim que este cenário é a melhor opção aquando da necessidade de expedir componentes para Mielec (Polónia). Apesar do aumento da distância do cenário T1 relativamente ao cenário base, aquele apresenta reduções, ainda que residuais, nas seguintes categorias de impacte ambiental: Alterações climáticas, Depleção da camada de ozono, Depleção abiótica e Energia primária de recursos não renováveis. De todos os cenários considerados, é no cenário T2 que ocorre o maior aumento de impactes ambientais na fase de transporte, com um aumento relativo de aproximadamente 520% na categoria de Acidificação. Nesta categoria, a fase de transporte tem um peso significativo no total da fase

de produção (cerca de 18%), implicando um aumento de 24,7% nos impactes totais da fase de produção, quando comparado com o cenário base. O cenário T2, apesar de ter a maior distância percorrida de todos os cenários, apresenta maiores impactes em relação aos restantes cenários apenas nas categorias de Acidificação (devido ao aumento de emissões de SO₂ pelo navio) e de Emissão de partículas (devido às emissões de NO_x geradas pelo navio). Neste cenário ocorre a maior redução de impactes em relação ao cenário base, na categoria da Depleção da camada de ozono, com uma redução de 2,1% (devido à diminuição do consumo de combustível petrolífero), indicando assim que o transporte marítimo apresenta vantagens em relação ao transporte rodoviário.

Com os resultados obtidos verifica-se que à medida que a distância ao destino final aumenta, os consequentes impactes também aumentam. Relativamente ao tipo de transporte conclui-se que o transporte marítimo é mais favorável em relação ao transporte rodoviário, pelo que deve ser preferido dada a possibilidade de escolha. No entanto, apesar das vantagens que este tipo de transporte possa trazer ao desempenho ambiental da fase de transporte, há que considerar que esta fase, relativamente aos impactes totais de ciclo de vida do apoio de braço, possui um peso residual entre 0,24% (Eutrofização da água doce) e 4,22% (Eutrofização marinha), pelo que a sua melhoria não afetará o desempenho ambiental de ciclo de vida do componente automóvel.

Tabela 4.8. Comparação dos impactes ambientais por apoio de braço B3 entre os cenários alternativos de transporte e o cenário base. Os valores negativos correspondem a um aumento dos impactes ambientais.

Cenário de Transporte	<i>Armrest</i> B3	Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	Depleção da camada de ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificação [kg SO ₂ eq]	Eutrofização da água doce [kg P eq]	Eutrofização marinha [kg N eq]	Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	Emissão de partículas [kg PM ₁₀ eq]	Depleção abiótica [kg Sb eq]	Energia primária de recursos não renováveis [MJ _P]
D1	D1	4,85E-02	7,30E-09	1,90E-04	6,59E-08	1,06E-05	2,99E-04	7,50E-05	3,05E-04	6,94E-01
	<i>cradle-to-gate</i>	7,59E-01	3,65E-08	3,02E-03	2,53E-05	9,26E-05	3,02E-03	1,21E-03	8,54E-03	1,90E+01
	Δ Base	-1,7%	-5,6%	-1,7%	-0,1%	-3,1%	-2,7%	-1,7%	-0,9%	-1,0%
D2	D2	6,34E-02	9,55E-09	2,48E-04	8,63E-08	1,39E-05	3,91E-04	9,82E-05	3,99E-04	9,08E-01
	<i>cradle-to-gate</i>	7,74E-01	3,87E-08	3,08E-03	2,53E-05	9,59E-05	3,11E-03	1,23E-03	8,63E-03	1,92E+01
	Δ Base	-3,7%	-12,1%	-3,7%	-0,1%	-6,8%	-5,8%	-3,6%	-2,1%	-2,1%
D3	D3	1,13E-01	1,71E-08	4,43E-04	1,54E-07	2,48E-05	6,99E-04	1,75E-04	7,12E-04	1,62E+00
	<i>cradle-to-gate</i>	8,24E-01	4,62E-08	3,27E-03	2,54E-05	1,07E-04	3,42E-03	1,31E-03	8,95E-03	1,99E+01
	Δ Base	-10,4%	-33,8%	-10,2%	-0,4%	-18,9%	-16,3%	-10,1%	-5,8%	-5,9%
T1	T1	3,39E-02	4,82E-09	3,76E-04	4,90E-08	1,24E-05	3,56E-04	1,23E-04	2,16E-04	4,91E-01
	<i>cradle-to-gate</i>	7,44E-01	3,40E-08	3,20E-03	2,53E-05	9,44E-05	3,07E-03	1,26E-03	8,45E-03	1,88E+01
	Δ Base	0,2%	1,6%	-8,0%	0,0%	-5,2%	-4,6%	-5,7%	0,1%	0,1%
T2	T2	3,66E-02	4,65E-09	8,72E-04	5,83E-08	2,30E-05	6,66E-04	2,69E-04	2,37E-04	5,41E-01
	<i>cradle-to-gate</i>	7,47E-01	3,38E-08	3,70E-03	2,53E-05	1,05E-04	3,38E-03	1,40E-03	8,47E-03	1,88E+01
	Δ Base	-0,1%	2,1%	-24,7%	0,0%	-17,0%	-15,2%	-17,9%	-0,2%	-0,2%

4.2.3. Reciclagem: variação da origem do material reciclado e da percentagem incorporada

No cenário de reciclagem, foram considerados os processos 1, 5 e 6 da reciclagem mecânica (secção 2.3.2, Tabela 2.4), perfazendo um total de 472 Wh consumidos por quilograma de PP reciclado (Le Borgne e Feillard, 2001). Como referido na secção 2.3.2, foi seleccionado o apoio de braço B3 para o cenário de reciclagem, por este apresentar o melhor desempenho ambiental no ciclo de vida do cenário base. O fluxograma referente ao ciclo de vida deste cenário apresenta-se na Figura 4.5.

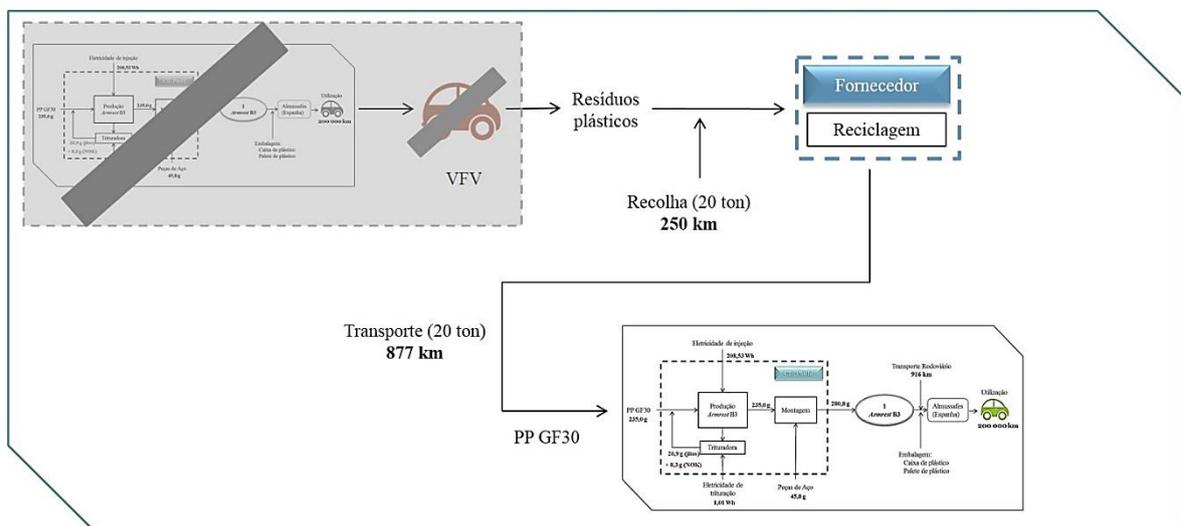


Figura 4.5. Fluxograma do ciclo de vida do apoio de braço B3 reciclado.

Relativamente à fronteira do sistema para a reciclagem do plástico, esta inicia-se com a disponibilização do PP como resíduo para ser aproveitado, ou seja, não se teve em conta os impactes que decorreram antes do PP ser considerado um resíduo, alocando assim os impactes associados à produção e utilização do PP virgem que deu origem ao resíduo apenas à sua primeira utilização (*cut-off approach*, ISO 14044:2006). Assim, o resíduo de plástico surge no sistema livre de impactes anteriores à sua disposição como resíduo, considerando assim a partir deste ponto apenas os impactes gerados pelos processos de recolha e tratamento final. Neste cenário, considerou-se então um resíduo plástico de PP que é recolhido por um camião de 20 toneladas (Le Borgne e Feillard, 2001) até ao fornecedor

em Espanha, onde ocorre a reciclagem mecânica, sendo depois encaminhado em grãos ou paletes, por um camião similar, até à CIE Plasfil.

De modo a poderem analisar-se os efeitos dos pressupostos tomados, bem como o peso dos impactes ambientais gerados nas fases do processo de reciclagem do PP, efetuou-se uma análise de sensibilidade a este cenário, considerando-se duas hipóteses relativamente à percentagem de plástico incorporado no apoio de braço (5 ou 10%) de acordo com indicações da CIE Plasfil. Adicionalmente, consideraram-se variações na fase de transporte, com uma opção em que o plástico reciclado provém de uma empresa da Marinha Grande, e outra em que a distância desde a recolha do resíduo até à central de reciclagem provém de uma média das distâncias consideradas nos estudos analisados. Todos estes cenários estão indicados na Tabela 4.9. A coluna do material reciclado refere-se à percentagem de material reciclado incorporado no apoio de braço B3 e as colunas da distância até CR (central de reciclagem) e CR – CIE Plasfil correspondem, respetivamente, à distância percorrida entre a recolha do resíduo e a central de reciclagem e a distância percorrida entre a central de reciclagem e a CIE Plasfil.

Tabela 4.9. Cenários alternativos de recolha e reciclagem de resíduos de PP através de um camião de 20 toneladas.

Cenário	Material Reciclado [%]	Central de reciclagem (CR)	Distância da recolha até CR [km]	Distância CR – CIE Plasfil [km]
R5%	5	Espanha	250	877
R10%	10	Espanha	250	877
M10%	10	Marinha Grande	150	55,4
E10%	10	Espanha	600	877

Nos cenários R5% e R10% varia-se apenas a percentagem de material reciclado incorporado, enquanto no cenário M10% se varia adicionalmente a central de reciclagem, que passa a ser a Marinha Grande, implicando assim uma alteração nas distâncias de recolha e de transporte até à CIE Plasfil. No cenário E10% mantém-se a central de reciclagem em Espanha, alterando a distância de recolha para uma média de distâncias disponíveis na literatura para a realidade europeia. Os estudos considerados e as respetivas distâncias de recolha estão indicados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Estudos considerados de modo a determinar a distância média de recolha para a central de reciclagem.

Estudos analisados	Tipo de resíduo	País	Distância (s) [km]
Jenseit <i>et al.</i> (2003)	Componentes plásticos de VFV (Veículo em fim de vida)	Alemanha	400
Le Borgne <i>et al.</i> (2001)	Cobertura de para-choques de PP	França	850
Wager <i>et al.</i> (2015)	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE)	Suíça/Europa	250
			500
			1000
Média considerada:			600 km

Com os dados recolhidos, procedeu-se à quantificação dos impactes relativamente aos cenários de reciclagem referidos. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.11, podendo observar os impactes decorrentes do processo de fabrico do PP GF30, os impactes totais da fase de produção (*cradle-to-gate*) e a percentagem de variação destes impactes com os impactes do cenário base. Comparando os resultados dos cenários alternativos com o cenário base, há uma clara redução dos impactes ambientais em todos os cenários considerados em quase todas as categorias de impacte ambiental avaliadas, excetuando a categoria da Depleção da camada de ozono.

No cenário R5%, o peso dos impactes relativos ao processo de fabrico do PP GF30 no valor total de impactes da fase de produção varia entre 46% (Depleção da camada de ozono) e 81% (Energia primária de recursos não renováveis). No cenário R10% há uma maior redução dos impactes ambientais (entre 1 a 3% de impactes inferiores em relação ao cenário R5%, excetuando na categoria de Depleção da camada de ozono), devido ao aumento da percentagem de material reciclado, sendo que a maior redução ocorre na categoria de Energia primária de recursos não renováveis, com 6% de redução para um impacte total de 17,64 MJ_P/apoio de braço, cujo peso do processo de fabrico de PP GF30 é de 80% dos impactes totais da produção do apoio de braço B3. O maior aumento dos impactes ocorre na categoria de Depleção da camada de ozono, com uma redução de -1,6% de impactes totais, apresentando um impacte de $1,64 \times 10^{-8}$ kg CFC⁻¹¹ eq/apoio de braço para o processo de fabrico do PP GF30, o que corresponde a um aumento de 3% da produção do PP GF30 relativamente ao cenário base.

O cenário M10% possui o melhor desempenho ambiental para o apoio de braço B3, pois houve uma maior redução dos impactes ambientais relativamente à fase de produção, possuindo também menos impactes ambientais na categoria da Depleção da camada de ozono em relação aos outros cenários (excetuando o cenário base), devido à redução das distâncias percorridas.

Finalmente, no cenário E10%, como referido anteriormente, houve um aumento (140%) da distância percorrida da recolha dos resíduos à central de reciclagem. Na Tabela 4.11 observa-se que este aumento originou uma subida nos impactes ambientais em quase todas as categorias comparativamente aos cenários de 10% de material reciclado (excetuando a categoria de Eutrofização de água doce).

Conclui-se que um aumento da percentagem de material reciclado incorporado no apoio de braço B3 (de 5 para 10%) conduz a uma redução de entre 1% e 3% dos impactes ambientais (com exceção da categoria da Depleção da camada de ozono). O cenário M10% possui menores impactes ambientais (redução entre 0,2% e 0,9%) por haver uma diminuição da distância percorrida entre a central de reciclagem e a CIE Plasfil (menos 40%). Dada a possibilidade de escolha, a incorporação de 10% de material reciclado proveniente da Marinha Grande será a melhor hipótese, desde que sejam asseguradas as características funcionais e estruturais do apoio de braço.

Tabela 4.11. Comparação dos impactes ambientais por apoio de braço B3 entre os cenários alternativos de reciclagem e o cenário base. Os valores negativos correspondem a um aumento dos impactes ambientais.

Cenário	Armrest B3 Reciclado	Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	Depleção da camada de ozono [kg CFC ⁻¹¹ eq]	Acidificação [kg SO ₂ eq]	Eutrofização da água doce [kg P eq]	Eutrofização marinha [kg N eq]	Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	Emissão de partículas [kg PM ₁₀ eq]	Depleção abiótica [kg Sb eq]	Energia primária de recursos não renováveis [MJF]
R5%	R5%	0,49	1,61E-08	1,87E-03	1,41E-05	5,44E-05	1,87E-03	6,26E-04	6,40E-03	14,76
	<i>cradle-to-gate</i>	0,73	3,48E-08	2,94E-03	2,50E-05	8,90E-05	2,89E-03	1,18E-03	8,21E-03	18,22
	Δ Base	1,8%	-0,8%	1,1%	1,0%	0,9%	1,7%	0,9%	2,9%	3,1%
R10%	R10%	0,48	1,64E-08	1,84E-03	1,38E-05	5,36E-05	1,82E-03	6,16E-04	6,15E-03	14,19
	<i>cradle-to-gate</i>	0,72	3,51E-08	2,90E-03	2,48E-05	8,81E-05	2,84E-03	1,17E-03	7,97E-03	17,65
	Δ Base	3,5%	-1,6%	2,1%	2,0%	1,9%	3,4%	1,7%	5,8%	6,1%
M10%	M10%	0,48	1,61E-08	1,83E-03	1,38E-05	5,32E-05	1,81E-03	6,13E-04	6,14E-03	14,16
	<i>cradle-to-gate</i>	0,72	3,48E-08	2,90E-03	2,48E-05	8,77E-05	2,83E-03	1,17E-03	7,96E-03	17,62
	Δ Base	3,8%	-0,7%	2,4%	2,0%	2,3%	3,8%	2,0%	6,0%	6,3%
E10%	E10%	0,48	1,65E-08	1,84E-03	1,38E-05	5,38E-05	1,83E-03	6,17E-04	6,16E-03	14,20
	<i>cradle-to-gate</i>	0,72	3,52E-08	2,91E-03	2,48E-05	8,83E-05	2,84E-03	1,17E-03	7,97E-03	17,66
	Δ Base	3,4%	-1,9%	2,0%	2,0%	1,7%	3,2%	1,6%	5,7%	6,0%

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões mais importantes do estudo efetuado nesta dissertação, incluindo as principais limitações consideradas. Por fim, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

O principal objetivo desta dissertação foi a realização de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para apoiar o ecodesign de componentes de apoios de braço de automóvel, tanto a nível da fase de produção como a nível do ciclo de vida. A investigação aqui apresentada foi desenvolvida no âmbito do Projeto EDIL, entre o Centro para a Ecologia Industrial da FCTUC e a empresa CIE Plasfil, uma unidade transformadora de plásticos por injeção na Figueira da Foz. O estudo foi centrado na ACV a dois apoios de braço produzidos na unidade fabril – B (aço) e J (plástico) – e a três novos modelos alternativos de apoios de braço que surgiram como oportunidade de melhoria do modelo B através do ecodesign, que acresce aos critérios normais de decisão relativamente ao *design* o desempenho ambiental do produto. Com base num estudo efetuado pela CIE Plasfil, desenvolveram-se novos modelos funcionais a partir do modelo B (modelos B1, B2 e B3). Procedeu-se à modelação do ciclo de vida dos apoios de braço, determinando os fluxos de entrada e saída de matéria-prima e energia, desde a extração da matéria-prima até ao envio do apoio de braço para o seu recetor final. Quantificaram-se os impactes ambientais em nove categorias, relativos a todos os processos decorrentes até a esse ponto, bem como a quantificação dos impactes gerados na fase de utilização, ou seja, quando os componentes fazem parte integrante de um veículo automóvel. Por fim, efetuou-se uma análise de sensibilidade relativamente ao tipo de tecnologia utilizada no processo de injeção do plástico, ao tipo de transporte utilizado e destino final dos apoios de braço após saírem da fábrica e, por fim, à hipótese de incorporação de 5 e 10% de plástico reciclado na produção do apoio de braço com melhor desempenho ambiental (apoio de braço B3).

5.1. Conclusões da ACV

Na fase de produção, verifica-se que o apoio de braço mais pesado (B) não é o que apresenta maior impacto ambiental na maioria das categorias analisadas, mas sim o apoio de braço J, devido à produção do seu plástico constituinte, PBT PET GF30, que contribui com um peso relativo entre 62 e 85% dos impactos totais. Relativamente ao desempenho ambiental dos modelos alternativos, constatou-se que estes apresentavam melhorias relativamente aos apoios de braço B e J em quase todas as categorias de impacto ambiental. Dos modelos analisados, constatou-se que o apoio de braço B3 constituído por PP GF30 (modelo mais leve) possui o melhor desempenho ambiental em todas as categorias de impacto.

Na fase de utilização, foram quantificados os impactos referentes a um veículo ligeiro de 200 000 km de vida útil, tendo sido feita uma análise de sensibilidade aos quilómetros percorridos na vida útil, entre 100 000 e 300 000 km. Verifica-se que o apoio de braço J apresenta, ao quilómetro zero, um maior impacto ambiental que o apoio de braço B, devido aos resultados apresentados na fase de produção. Após o início da utilização, o apoio de braço B produz um maior impacto por quilómetro percorrido, acabando por superá-lo ao longo da utilização. O ponto a partir do qual ocorre esta transição denomina-se ponto de indiferença. Estes pontos ocorrem na maioria das categorias de impacto ambiental (excetuando a Eutrofização de água doce e a Emissão de partículas), entre alguns dos apoios de braço.

Finalmente na análise ao desempenho ambiental do ciclo de vida dos apoios de braço, constata-se que a maioria dos impactos ambientais decorre na fase de utilização, representada entre 76 e 95% dos impactos totais, excetuando a categoria de Eutrofização de água doce, onde esta fase tem um peso de 33%. A fase de transporte apresenta um contributo pouco significativo para os impactos ambientais totais de ciclo de vida. O apoio de braço B3 possui o melhor desempenho ambiental dos cinco modelos analisados para todas as categorias. Verifica-se que um estudo centrado apenas na fase de produção pode gerar resultados distintos de um estudo que considera todas as fases de ciclo de vida, o que reitera a necessidade de conjugação da metodologia do ecodesign com a abrangência da ACV.

Em complemento ao cenário base considerado, efetuou-se uma análise de sensibilidade a três aspetos considerados relevantes para o sistema em apreço.

Primeiramente alteraram-se as máquinas injetoras hidráulicas por máquinas elétricas, verificando que há uma melhoria relativamente ao desempenho ambiental do processo de injeção em todas as categorias de impacte ambiental e que a maior percentagem de redução dos impactes ambientais ocorre nas categorias de impacte onde o processo de injeção tem um peso relativo superior em relação aos impactes totais da fase de produção. O processo de injeção tem uma maior relevância nas categorias de Eutrofização da água doce, onde a percentagem de redução neste cenário tem uma média de 11%.

Na análise de sensibilidade ao transporte verifica-se que à medida que a distância ao destino final aumenta, os consequentes impactes também aumentam. Relativamente ao tipo de transporte, conclui-se que o transporte marítimo é ambientalmente favorável em relação ao transporte rodoviário, pelo que deve ser preferido dada a possibilidade de escolha. No entanto, apesar das vantagens que este tipo de transporte possa trazer ao desempenho ambiental da fase de transporte, há que considerar que esta fase, relativamente aos impactes totais de ciclo de vida do apoio de braço, possui um peso residual entre 0,24% (Eutrofização da água doce) e 4,22% (Eutrofização marinha), pelo que a sua melhoria não afetará o desempenho ambiental de ciclo de vida do componente automóvel.

Relativamente à análise de sensibilidade de reciclagem, quantificaram-se os resultados correspondentes a quatro cenários alternativos, onde variaram-se os quilómetros percorridos em cada uma das fases de transporte do material reciclado até à chegada à CIE Plasfil, bem como a percentagem de material reciclado incorporado. Foi analisado apenas o apoio de braço B3 por este apresentar o melhor desempenho ambiental no cenário base.

No cenário R5%, o peso dos impactes relativos ao processo de fabrico do PP GF30 no valor total de impactes da fase de produção varia entre 46% (Depleção da camada de ozono) a 81% (Energia primária de recursos não renováveis). No cenário R10%, as reduções acentuam (excetuando na categoria da Depleção da camada de ozono) devido ao aumento da percentagem de material reciclado, sendo que a maior redução ocorre na categoria de Energia primária de recursos não renováveis, com 6% de redução para um impacte total de 17,64 MJ_P/apoio de braço, cujo peso do processo de fabrico de PP GF30 é de 80% dos impactes totais da produção do apoio de braço B3.

O cenário M10% possui o melhor desempenho ambiental dos cenários analisados, pois houve uma maior redução dos impactes ambientais relativamente à fase de

produção, possuindo também menos impactes ambientais na categoria da Depleção da camada de ozono em relação aos outros cenários (excetuando o cenário base). Dado que no cenário E10% houve um aumento da distância percorrida da recolha dos resíduos à central de reciclagem, verificou-se um aumento na maioria dos impactes ambientais, excetuando na categoria da Eutrofização da água doce.

Conclui-se que um aumento da percentagem de material reciclado incorporado no apoio de braço B3 (de 5 para 10%) conduz a uma redução dos impactes ambientais na fase de produção (com exceção da categoria de Depleção da camada de ozono). O cenário M10% possui menores impactes ambientais (redução entre 0,2% e 0,9%) por haver uma diminuição da distância percorrida entre a central de reciclagem e a CIE Plasfil (menos 40%). Dada a possibilidade de escolha, a incorporação de 10% de material reciclado proveniente da Marinha Grande será a melhor hipótese, desde que sejam asseguradas as características funcionais e estruturais do apoio de braço.

5.2. Limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros

Neste estudo foram considerados vários pressupostos e hipóteses simplificadoras de modo a poder proceder-se à modelação do ciclo de vida dos apoios de braço:

- I.** Os apoios de braço B e J possuem funcionalidades ligeiramente diferentes, pois são utilizados em veículos diferentes. Tal não foi considerado neste estudo.
- II.** Quanto ao apoio de braço B (aço), este possui na prática, para os resultados apresentados, apenas PP como constituinte plástico devido à falta de dados disponíveis na base de dados. Dado que o peso do POM é relativamente pequeno, assumiu-se que as variações decorrentes dessa alteração seriam residuais.
- III.** O processo de cataforese apresenta fluxos de saída de materiais cujo destino final não foi analisado devido à falta de informação disponível.

-
- IV.** Nos novos modelos alternativos, considerou-se que o consumo de energia no processo de injeção do PP GF30 é o mesmo que o do PBT PET GF30 e que a quantidade de jitos produzida é a mesma que a do apoio de braço J.
 - V.** Nas embalagens, partiu-se do pressuposto que uma paleta de plástico é 70% mais leve que uma paleta de madeira (Tecnotri, 2015). As características das embalagens não foram confirmadas, tendo-se baseado em Fernandes (2015) para completar a informação que não estava disponível. Assumiu-se que a caixa e a paleta de plástico são constituídas por PP.
 - VI.** Adicionalmente não foram considerados os impactes associados às infraestruturas onde os apoios de braço são produzidos, nem os valores referentes a emissões a longo prazo, de modo a diminuir a incerteza dos resultados apresentados.
 - VII.** Relativamente ao transporte até ao destino final, assumiu-se que os camiões voltam vazios, o que não corresponde à realidade, não tendo sido analisado este cenário por falta de informação disponível.
 - VIII.** No cenário alternativo do tipo de tecnologia de injeção, assumiu-se um valor médio para a poupança de energia associada, embora a poupança seja aproximadamente a mesma, independentemente da gama da máquina escolhida.
 - IX.** No cenário alternativo de reciclagem considerou-se que os consumos do PP reciclado irão incluir apenas os gastos da reciclagem e o transporte desde a recolha do resíduo até à central de reciclagem, e da mesma até à CIE Plasfil. Muitos dos valores utilizados neste cenário vêm da literatura, o que pode levar a um aumento da incerteza na análise dos resultados obtidos.

Tendo em conta estas limitações, recomendam-se os seguintes trabalhos futuros:

- Análise ao tratamento e destino final do processo da cataforese;
- Estudo mais aprofundado da gestão de resíduos plásticos de componentes automóveis;

- Avaliação aos impactes gerados pela matéria-prima POM e determinação da sua significância para os impactes totais da fase de produção do apoio de braço B;
- Determinação das características das embalagens e análise do cenário onde não haja retorno vazio dos camiões de transporte;
- Análise de sensibilidade à variação dos consumos energéticos com a gama das máquinas de injeção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Salem, S., Lettieri, P., Baeyens, J. (2009) “Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review”. *Waste Management*, 29, 2625–2643. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002190>
- Alves, C., Ferrão, P., Silva, A., Reis, L., Freitas, M., Rodrigues, L., Alves, D. (2010) “Ecodesign of automotive components making use of natural jute fibers”. *Journal of Cleaner Production*, 18, 313–327. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652609003503>
- Bajracharya, R., Manalo, A., Karunasena, W., Lau, K. (2014) “An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites”. *Materials and Design*, 62, 98–112. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306914003562>
- Fernandes, M. P. (2015). “Avaliação de Ciclo de Vida de dois componentes para automóveis produzidos na CIE Plasfil”. Tese de Mestrado de Engenharia do Ambiente na especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Ferrão, P. (2009), “Ecologia Industrial: Princípios e Ferramentas”, 1ª Ed., IST Press.
- Ferreira, C., Esteves, C., Silva, P., Tomé, G., Freire, F. (2013). “Comparative life-cycle assessment of two car armrests produced at CIE Plasfil”. *Proceedings for Energy for Sustainability 2013: Sustainable cities: designing for People and the Planet*, Coimbra, Portugal, 8–10 September 2003. Disponível em: http://www.uc.pt/en/efs/research/EESEVS/f/ID142_Ferreira.pdf
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A., Struijs, J., Zelm, R. (2013) “ReCiPe 2008. A Life Cycle Impact Assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation”. Ministério da Habitação, Ordenamento do Território e do Ambiente, May 2013. Disponível em: <http://www.pre-sustainability.com/recipe-report>
- ISO 14040 (2006), *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. EN ISO 14040:2006. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça.
- ISO 14044 (2006), *Environmental management - life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*. EN ISO 14044:2006. International Organization for Standardization, Geneva, Suíça.
- Jenseit, W., Stahl, H., Wollny, V., Wittlinger, R. (2003) “Recovery Options for Plastic Parts from End-of-Life Vehicles: an Eco-Efficiency Assessment”. Öko-Institut

- e.V., May 2013. Disponível em: <http://www.ecodialog.de/oekodoc/151/2003-039-en.pdf>
- Johansson, J., Finnveden, G., Lind, P., Moberg, A. (2000) “Life Cycle Assessments of Energy from Solid Waste.” FMS (Environmental Strategies Research Group) Report, Stockholm University, Sweden. Disponível em: <http://infohouse.p2ric.org/ref/37/36459.pdf>
- Kampe, S.L. (2001), “Incorporating Green Engineering in Materials Selection and Design”, Proceedings of The 2001 Green Engineering Conference: Sustainable and Environmentally-Conscious Engineering, Virginia Tech’s College of Engineering and the U.S. Environmental Protection Agency, Roanoke, Virginia, USA, 29–31 July 2001. Disponível em: https://www-test.grantadesign.com/download/papers/customers/Green_at_VPI.pdf
- Le Borgne, R., Feillard, (2001) “End-of-life of a polypropylene bumper skin” (2001) International Journal of Life Cycle Assessment, 6, 167–176. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02978735>
- Luz, S., Caldeira-Pires, A., Ferrão, P. (2010). “Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components”. Resources, Conservation and Recycling, 54, 1135–1144. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134491000073X>
- Mayyas, A., Qattawi, A., Omar, M., Shan, D. (2012). “Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive review”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 1845–1862. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000135>
- Meran, C., Ozturk, O., Yuksel, M. (2008) “Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene”. Materials and Design. 29, 701–705. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306907000507>
- Oers, L., Koning, A., Guinée, J., Huppes, G. (2002) “Abiotic resource depletion in LCA: Improvin characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook”. Road and Hydraulic Engineering Institute, June 2002. Disponível em: <http://www.cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/abiotic-depletion-lcia.html>
- Pilz, H., Fehringer, R., Brandt, B. (2010) “The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe”. 1–45 (2010). Denkstatt, June 2010. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/Document/the-impact-of-plastics-on-life-cycle-energy-consumption-and-greenhouse-gas-emissions-in-europe.aspx?Page=SEARCH&FolID=2>
- PlasticsEurope (2011a) “Eco-profiles and environmental declarations – Life Cycle Inventory methodology and Product Category Rules for Uncompounded Polymer Resins and Reactive Polymer Precursors”. PlasticsEurope, April 2011.

- Disponível em:
http://www.plasticseurope.org/documents/document/20110421141821-plasticseurope_eco-profile_methodology_version2-0_2011-04.pdf
- PlasticsEurope (2011b) “Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle Grade)”. PlasticsEurope, May 2011. Disponível em:
<http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability-14017/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r55>
- PlasticsEurope (2011c) “Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: Polycarbonate (PC)”. PlasticsEurope, March 2011. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability-14017/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r402>
- PlasticsEurope (2014a) “Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: Polypropylene (PP)”. PlasticsEurope, April 2014. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability-14017/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r30>
- PlasticsEurope (2014b) “Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: Polyoxymethylene (POM)”. PlasticsEurope, February 2014. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability-14017/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r3400>
- PlasticsEurope (2015) “Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers: Styrene Acrylonitrile (SAN) and Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)”. PlasticsEurope, February 2015. Disponível em: <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability-14017/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r306>
- Pouligidou, S., Schneider, C., Björklund, A., Kazemahvazi, S., Wennhage, P., Zenkert, D. (2015) “A material selection approach to evaluate material substitution for minimizing the life cycle environmental impact of vehicles”. *Materials & Design*, 83, 704–712. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515004293>
- PRé (2015) “SimaPro Database Manual, Methods library”. PRé, April 2015. Disponível em: <http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>
- Ribeiro, C., Ferreira, J. V., Partidário, P. (2007).”Life cycle assessment of a multi-material car component.” *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, 336–345. Disponível em:
http://www.researchgate.net/publication/225676092_Life_cycle_assessment_of_a_multi-material_car_component
- Safaei, A., Malça, J., Ferreira, C., Fernandes, M., Tomé, G., Esteves, C., Silva, P., Freire, F. (2015). “Greenhouse gas assessment of an automobile plastic component produced at CIE Plasfil”. *Proceedings for Energy for Sustainability 2015: Sustainable cities: designing for People and the Plane*, Coimbra, Portugal, 14–15 May 2015.

-
- Selke, S.E.M. (1994), “Packaging and the environment – Revised Edition”, Technomic Publishing Company, Inc., USA.
- Shonfield, P. (2008) “LCA of Management Options for Mixed Waste Plastics.” WRAP, June 2008.
- Tecnotri. “Pallet Plástico PL022 1300x1300”. Acedido a 28 de Abril 2015, em <http://www.tecnotri.com.br/produto/index/73/Pallet%2BP1%25C3%25A1stico%2BPL022%2B1300x1300>
- Wäger, P., Hischier, R. (2015) “Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant”. *Science of the Total Environment*, 529, 158–167. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715301017>
- Witik, R., Payet, J., Michaud, V., Ludwig, C., Manson, J. (2011). “Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications”. *Composites: Part A*, 42, 1694–1709. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X11002302>
- Zah, R., Hischier, H., Leão, A.L., Braun, I. (2007) “Curauá fibers in the automobile industry – a sustainability assessment”. *Journal of Clear Production*, 15, 1032–1040. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652606003507>

APÊNDICE A – CATEGORIAS DE IMPACTE ANALISADAS

Tabela Ap. 1. Métodos de cálculo selecionados e descrição das respectivas categorias de impacte ambiental.

Método	Categoria	Descrição
ReCiPe (Goedkoop <i>et al.</i> , 2013)	Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	Quantidade de gases emissores de efeito de estufa, devido a alterações na capacidade da atmosfera relativamente à adsorção infravermelha da luz solar, podendo assim provocar efeitos negativos no clima da Terra, considerando para este efeito os fatores de radiação, temperatura, danos para a saúde humana e danos para o ecossistema.
	Depleção da camada de ozono [kg CFC ⁻¹¹ eq]	Destruição da camada de ozono devido a emissões antropogénicas de substâncias que a degradam. Esta categoria é uma medida da capacidade destas emissões de provocarem a depleção da camada de ozono, tendo como referência o CFC ⁻¹¹ (Clorofluorocarboneto).
	Acidificação [kg SO ₂ eq]	Acidificação devido à deposição de substâncias inorgânicas no solo, provocada pelas emissões antropogénicas. Estas substâncias alteram a acidez do solo, o que é prejudicial para a Flora existente, pois esta é sensível a este parâmetro do solo.
	Eutrofização da água doce [kg P eq]	Enriquecimento nutritivo do ambiente aquático devido a atividades humanas. Como a água doce e a água marinha têm causas e substâncias poluidoras, a eutrofização da água está dividida relativamente ao tipo de água em causa. Na água doce, considera-se o fósforo (P) como o nutriente que controla o crescimento dos produtores primários.
	Eutrofização marinha	No caso da água marinha, o nutriente em causa é o azoto (N), cujo aumento devido a atividades antropogénicas provoca um crescimento acentuado das algas, causando assim efeitos ecológicos adversos.
	Oxidação fotoquímica [kg NMVOC eq]	Contribuição de substâncias individuais para a criação de ozono, devido à reatividade, num volume de ar, com o etileno, formando ozono, medida através de compostos orgânicos voláteis não-metanos (NMVOC). Esta medição é feita através da relação entre a alteração da concentração de ozono devido a uma alteração em

		emissões de um VOC (composto orgânico volátil), e a alteração da concentração de ozono devido a uma alteração equivalente de etileno.
	Emissão de partículas [kg PM ₁₀ eq]	Partículas em suspensão com diâmetro inferior a 10 µm, emitidas por fontes antropogénicas. Estas partículas representam uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas, provocando graves problemas respiratórios quando inaladas.
CML 2001	Depleção abiótica [kg Sb eq]	Extração de elementos e combustíveis fósseis, tendo como referência a depleção do elemento antimónio (Sb) (Oers <i>et al.</i> , 2002). Refere-se à diminuição da disponibilidade de recursos abióticos (não vivos) como resultado do seu consumo acima da taxa de renovação/recuperação do mesmo.
CED (PRé, 2015)	Energia primária de recursos não renováveis [MJ _P]	Uso de energia direta e indiretamente ao longo do ciclo de vida das matérias-primas. Está dividida nos recursos de energia disponíveis. Relativamente aos recursos não renováveis, a categoria subdivide-se em energia fóssil e nuclear.

APÊNDICE B – RESULTADOS DA FASE DE PRODUÇÃO DOS APOIOS DE BRAÇO

Tabela Ap. 2. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.

Categorias de Impacte	Aço	PP	Transporte Inicial	Transporte Final	Cataforese	Caixa de plástico	Palete de Plástico	Total
Alterações climáticas [kg CO₂ eq]	8,50E-01	2,17E-01	8,37E-02	6,10E-02	1,65E-01	3,36E-03	3,66E-04	1,38E+00
Depleção da camada de ozono [kg CFC⁻¹¹ eq]	3,53E-08	5,10E-11	1,26E-08	9,19E-09	9,07E-09	7,89E-13	8,60E-14	6,62E-08
Acidificação [kg SO₂ eq]	3,02E-03	6,21E-04	3,28E-04	2,39E-04	9,51E-04	9,60E-06	1,05E-06	5,16E-03
Eutrofização da água doce [kg P eq]	6,64E-05	4,75E-06	1,14E-07	8,30E-08	9,20E-06	7,34E-08	8,00E-09	8,07E-05
Eutrofização marinha [kg N eq]	8,22E-05	1,76E-05	1,83E-05	1,34E-05	3,32E-05	2,72E-07	2,97E-08	1,65E-04
Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	2,87E-03	8,39E-04	5,16E-04	3,76E-04	5,52E-04	1,30E-05	1,41E-06	5,17E-03
Emissão de partículas [kg PM₁₀ eq]	3,09E-03	2,08E-04	1,30E-04	9,45E-05	3,01E-04	3,21E-06	3,50E-07	3,82E-03
Depleção abiótica [kg Sb eq]	7,23E-03	3,57E-03	5,27E-04	3,84E-04	1,26E-03	5,52E-05	6,01E-06	1,30E-02
Energia primária de recursos não renováveis [MJ_p]	1,30E+01	8,22E+00	1,20E+00	8,74E-01	2,21E+00	1,27E-01	1,38E-02	2,56E+01

Tabela Ap. 3. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço J através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.

Categories de Impacte	PBT PET GF30	Aço	Transporte Inicial	Transporte Final	Injeção	Trituração	Secagem	Palete de madeira	Caixa de cartão	Total
Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	1,14E+00	7,63E-02	7,72E-02	9,82E-02	1,81E-01	6,12E-04	2,63E-02	8,31E-04	1,40E-02	1,61E+00
Depleção da camada de ozono [kg CFC ⁻¹¹ eq]	6,72E-08	3,17E-09	1,16E-08	1,48E-08	8,80E-09	2,97E-11	1,28E-09	5,66E-11	1,25E-09	1,08E-07
Acidificação [kg SO ₂ eq]	4,25E-03	2,71E-04	3,02E-04	3,84E-04	1,05E-03	3,53E-06	1,52E-04	3,56E-06	6,73E-05	6,48E-03
Eutrofização da água doce [kg P eq]	3,38E-05	5,97E-06	1,05E-07	1,34E-07	1,02E-05	3,45E-08	1,48E-06	3,51E-08	8,80E-07	5,26E-05
Eutrofização marinha [kg N eq]	1,06E-04	7,38E-06	1,69E-05	2,15E-05	2,19E-05	7,39E-08	3,17E-06	1,74E-07	6,40E-06	1,83E-04
Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	3,44E-03	2,58E-04	4,76E-04	6,06E-04	5,91E-04	1,99E-06	8,56E-05	6,67E-06	4,96E-05	5,51E-03
Emissão de partículas [kg PM ₁₀ eq]	1,41E-03	2,77E-04	1,19E-04	1,52E-04	3,30E-04	1,11E-06	4,78E-05	1,60E-06	2,57E-05	2,37E-03
Depleção abiótica [kg Sb eq]	1,28E-02	6,49E-04	4,86E-04	6,18E-04	1,34E-03	4,52E-06	1,94E-04	8,54E-06	1,03E-04	1,62E-02
Energia primária de recursos não renováveis [MJ _P]	2,91E+01	1,17E+00	1,10E+00	1,41E+00	2,28E+00	7,71E-03	3,31E-01	1,99E-02	2,54E-01	3,57E+01

Tabela Ap. 4. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B1 através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.

Categories de Impacte	PBT PET GF30	Aço	Transporte Inicial	Transporte Final	Injeção	Secagem	Trituração	Caixa de plástico	Paleta de Plástico	Total
Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	9,03E-01	7,63E-02	6,14E-02	4,47E-02	1,25E-01	2,09E-02	5,17E-04	3,37E-03	3,66E-04	1,24E+00
Depleção da camada de ozono [kg CFC ⁻¹¹ eq]	5,33E-08	3,17E-09	9,25E-09	6,73E-09	6,05E-09	1,01E-09	2,51E-11	7,91E-13	8,60E-14	7,96E-08
Acidificação [kg SO ₂ eq]	3,38E-03	2,71E-04	2,41E-04	1,75E-04	7,19E-04	1,20E-04	2,99E-06	9,63E-06	1,05E-06	4,92E-03
Eutrofização da água doce [kg P eq]	2,68E-05	5,97E-06	8,36E-08	6,08E-08	7,02E-06	1,18E-06	2,92E-08	7,36E-08	8,01E-09	4,12E-05
Eutrofização marinha [kg N eq]	8,39E-05	7,38E-06	1,34E-05	9,77E-06	1,50E-05	2,52E-06	6,25E-08	2,73E-07	2,97E-08	1,32E-04
Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	2,73E-03	2,58E-04	3,79E-04	2,76E-04	4,06E-04	6,80E-05	1,69E-06	1,30E-05	1,41E-06	4,13E-03
Emissão de partículas [kg PM ₁₀ eq]	1,12E-03	2,77E-04	9,51E-05	6,91E-05	2,27E-04	3,80E-05	9,42E-07	3,22E-06	3,51E-07	1,83E-03
Depleção abiótica [kg Sb eq]	1,02E-02	6,49E-04	3,87E-04	2,81E-04	9,20E-04	1,54E-04	3,82E-06	5,53E-05	6,02E-06	1,26E-02
Energia primária de recursos não renováveis [MJ _P]	2,31E+01	1,17E+00	8,80E-01	6,39E-01	1,57E+00	2,63E-01	6,52E-03	1,27E-01	1,39E-02	2,78E+01

Tabela Ap. 5. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B2 através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.

Categorias de Impacte	PBT PET GF30	Aço	Transporte Inicial	Transporte Final	Injeção	Secagem	Trituração	Caixa de plástico	Paleta de Plástico	Total
Alterações climáticas [kg CO₂ eq]	7,05E-01	7,63E-02	4,81E-02	3,88E-02	9,66E-02	1,63E-02	4,73E-04	3,36E-03	3,66E-04	9,85E-01
Depleção da camada de ozono [kg CFC⁻¹¹ eq]	4,16E-08	3,17E-09	7,25E-09	5,85E-09	4,69E-09	7,91E-10	2,30E-11	7,90E-13	8,59E-14	6,34E-08
Acidificação [kg SO₂ eq]	2,64E-03	2,71E-04	1,88E-04	1,52E-04	5,57E-04	9,39E-05	2,73E-06	9,61E-06	1,05E-06	3,91E-03
Eutrofização da água doce [kg P eq]	2,09E-05	5,97E-06	6,54E-08	5,28E-08	5,44E-06	9,17E-07	2,67E-08	7,35E-08	8,00E-09	3,35E-05
Eutrofização marinha [kg N eq]	6,55E-05	7,38E-06	1,05E-05	8,50E-06	1,17E-05	1,97E-06	5,72E-08	2,73E-07	2,97E-08	1,06E-04
Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	2,13E-03	2,58E-04	2,97E-04	2,40E-04	3,15E-04	5,31E-05	1,54E-06	1,30E-05	1,41E-06	3,31E-03
Emissão de partículas [kg PM₁₀ eq]	8,75E-04	2,77E-04	7,45E-05	6,01E-05	1,76E-04	2,96E-05	8,62E-07	3,22E-06	3,50E-07	1,50E-03
Depleção abiótica [kg Sb eq]	7,94E-03	6,49E-04	3,03E-04	2,44E-04	7,13E-04	1,20E-04	3,49E-06	5,52E-05	6,01E-06	1,00E-02
Energia primária de recursos não renováveis [MJ_P]	1,80E+01	1,17E+00	6,89E-01	5,56E-01	1,22E+00	2,05E-01	5,96E-03	1,27E-01	1,38E-02	2,20E+01

Tabela Ap. 6. Comparação do desempenho ambiental da fase de produção por apoio de braço B3 através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.

Categories de Impacte	PP GF30	Aço	Transporte Inicial	Transporte Final	Injeção	Trituração	Caixa de plástico	Paleta de Plástico	Total
Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	5,05E-01	7,63E-02	4,03E-02	3,57E-02	8,43E-02	4,64E-04	3,36E-03	3,66E-04	7,46E-01
Depleção da camada de ozono [kg CFC ⁻¹¹ eq]	1,58E-08	3,17E-09	6,07E-09	5,38E-09	4,09E-09	2,26E-11	7,90E-13	8,60E-14	3,46E-08
Acidificação [kg SO ₂ eq]	1,90E-03	2,71E-04	1,58E-04	1,40E-04	4,86E-04	2,68E-06	9,62E-06	1,05E-06	2,97E-03
Eutrofização da água doce [kg P eq]	1,43E-05	5,97E-06	5,48E-08	4,86E-08	4,75E-06	2,62E-08	7,36E-08	8,00E-09	2,53E-05
Eutrofização marinha [kg N eq]	5,53E-05	7,38E-06	8,81E-06	7,81E-06	1,02E-05	5,61E-08	2,73E-07	2,97E-08	8,98E-05
Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	1,92E-03	2,58E-04	2,48E-04	2,20E-04	2,75E-04	1,51E-06	1,30E-05	1,41E-06	2,94E-03
Emissão de partículas [kg PM ₁₀ eq]	6,37E-04	2,77E-04	6,24E-05	5,53E-05	1,53E-04	8,46E-07	3,22E-06	3,50E-07	1,19E-03
Depleção abiótica [kg Sb eq]	6,65E-03	6,49E-04	2,53E-04	2,25E-04	6,22E-04	3,43E-06	5,53E-05	6,01E-06	8,46E-03
Energia primária de recursos não renováveis [MJ _P]	1,53E+01	1,17E+00	5,77E-01	5,11E-01	1,06E+00	5,85E-03	1,27E-01	1,38E-02	1,88E+01

APÊNDICE C – RESULTADOS DA FASE DE UTILIZAÇÃO DOS APOIOS DE BRAÇO

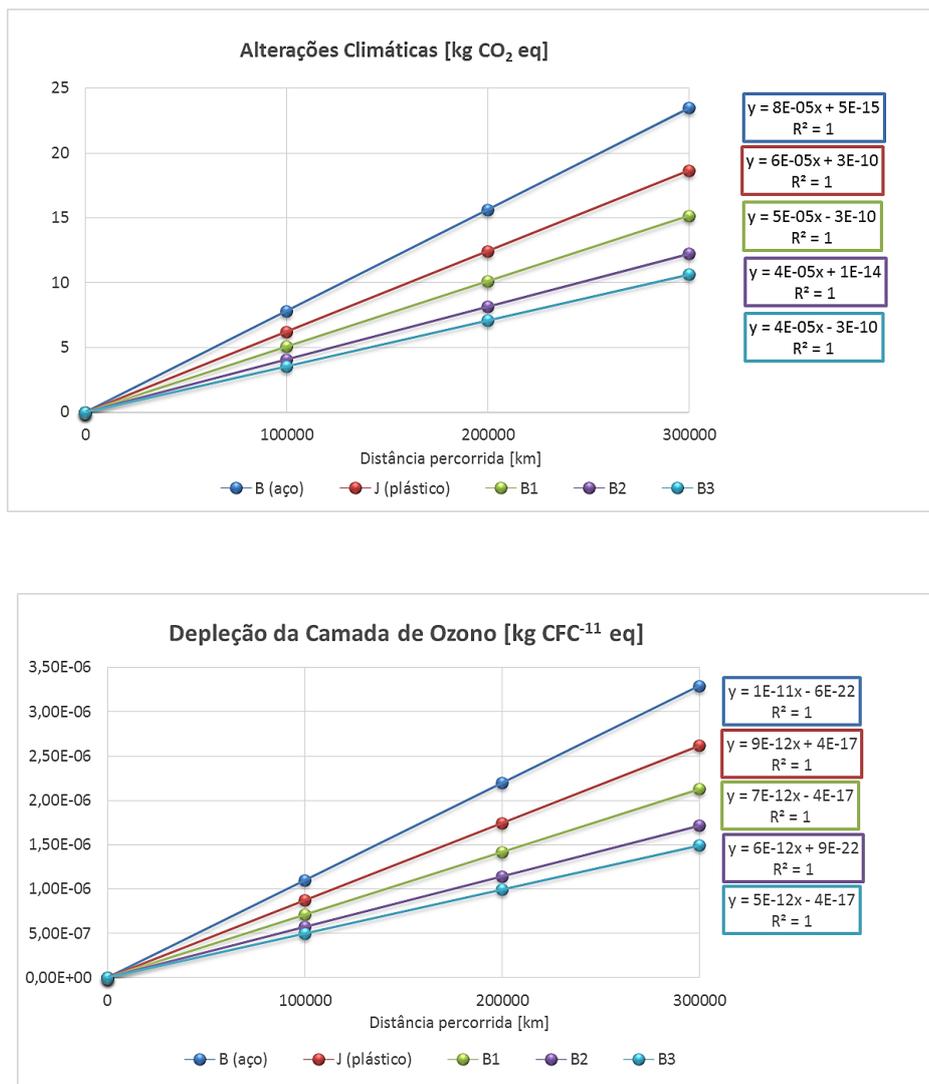


Figura Ap. 1. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Alterações climáticas e Depleção da camada de ozono.

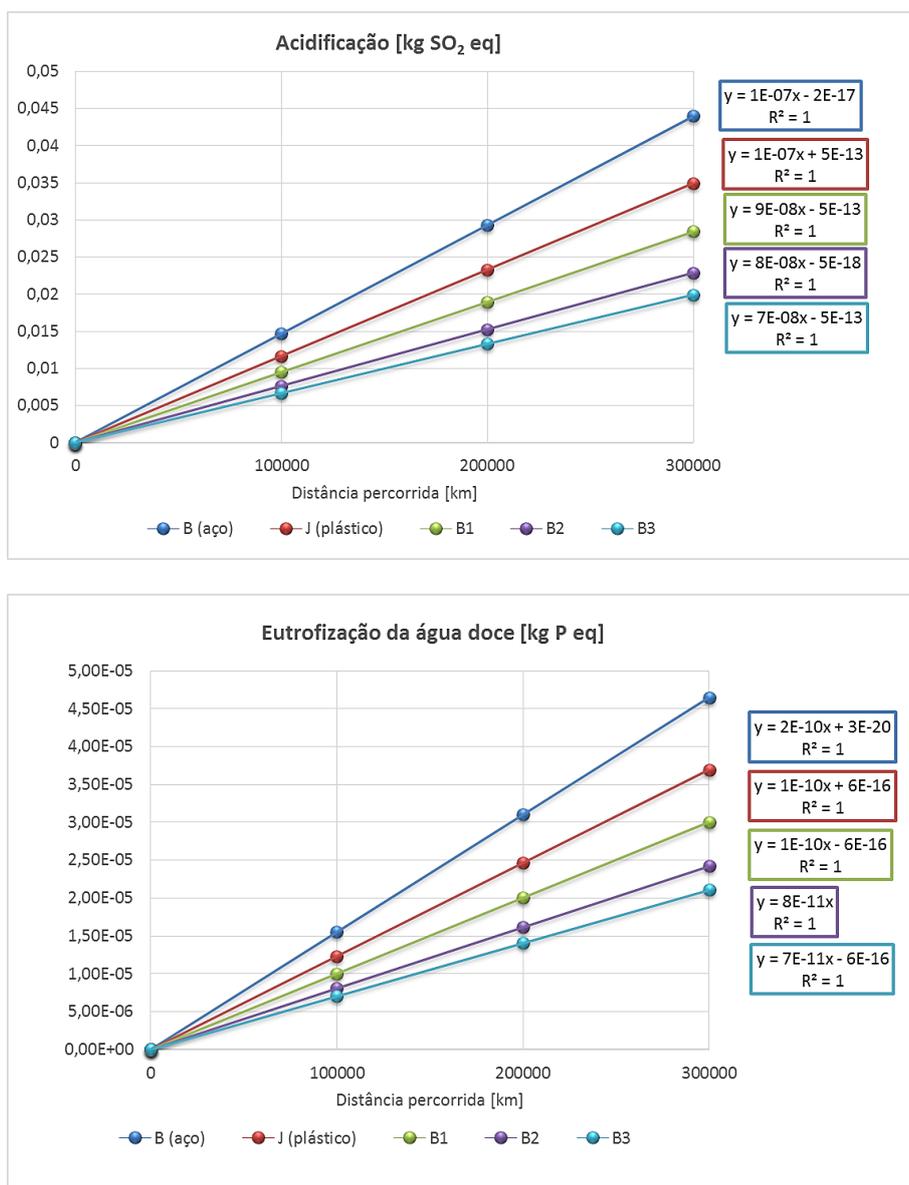


Figura Ap. 2. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Acidificação e Eutrofização da água doce.

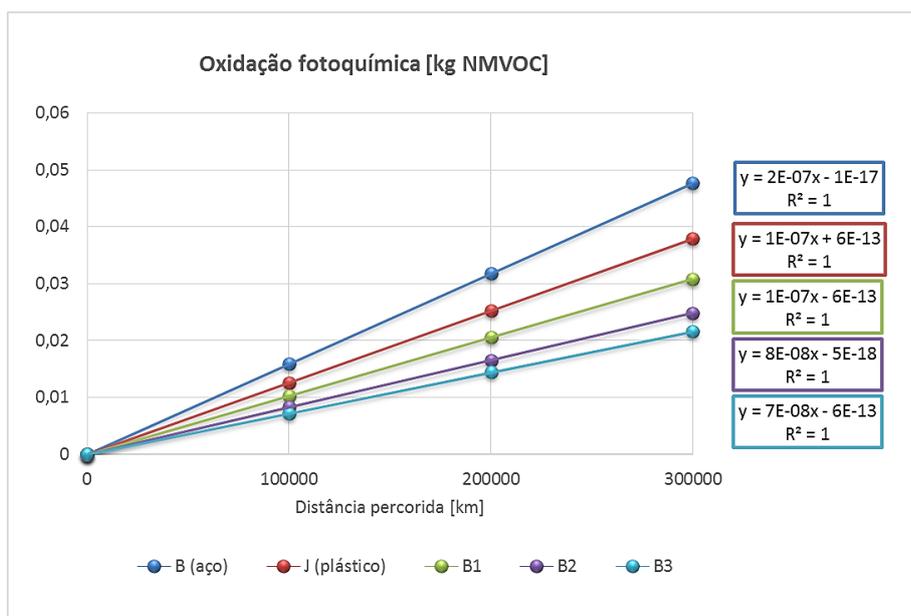
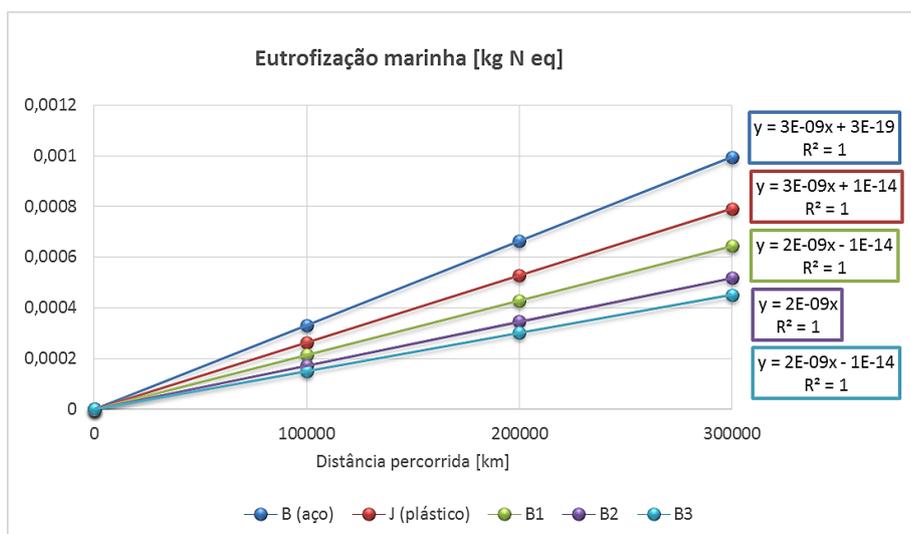


Figura Ap. 3. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Eutrofização marinha e Oxidação fotoquímica.

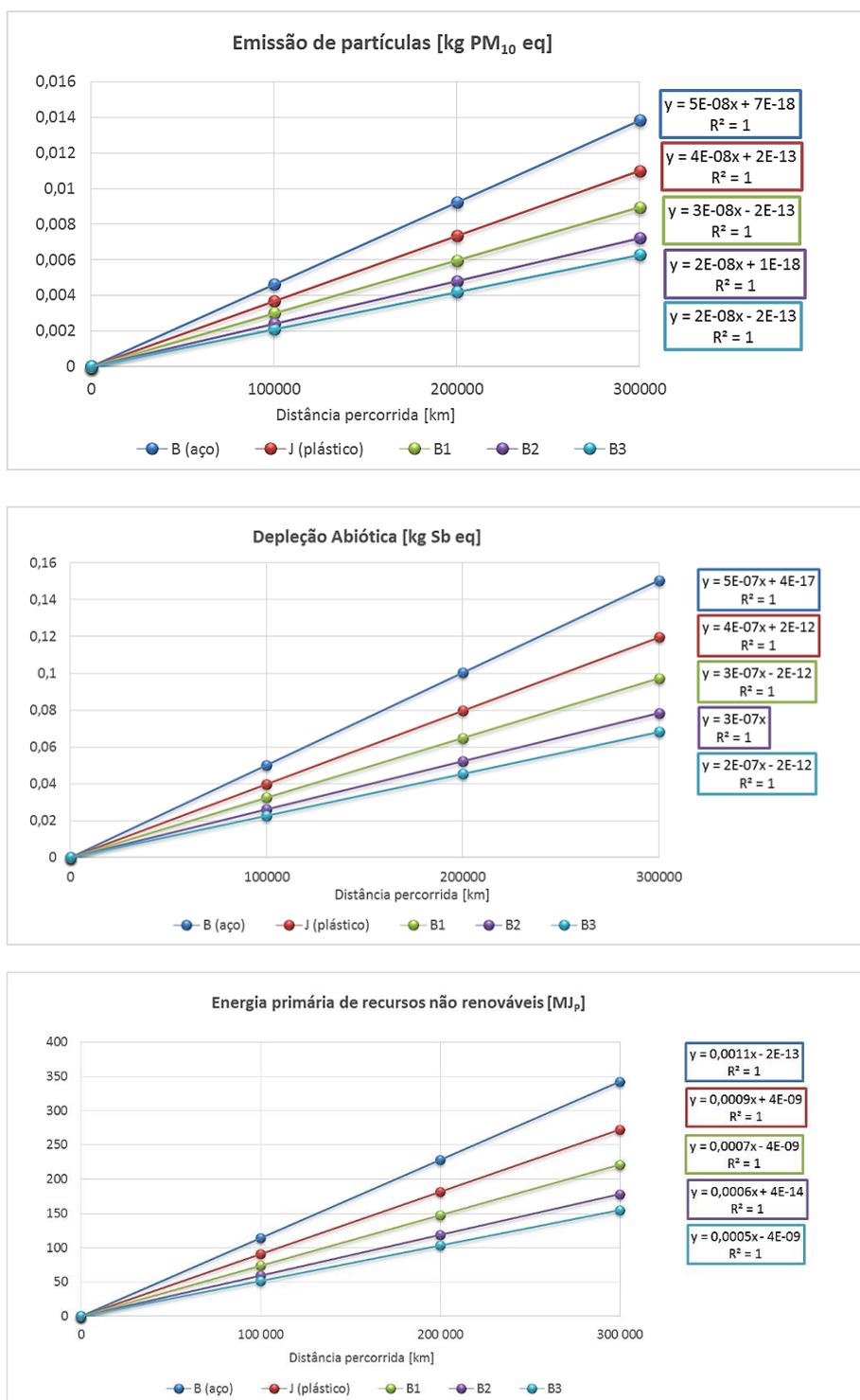


Figura Ap. 4. Comparação do desempenho ambiental por apoio de braço da fase de utilização nas categorias de Emissão de partículas, Depleção abiótica e Energia primária de recursos não renováveis.

APÊNDICE D – RESULTADOS DO CICLO DE VIDA DOS APOIOS DE BRAÇO

Tabela Ap. 7. Comparação do desempenho ambiental do ciclo de vida por apoio de braço B e J através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.

Apoio de braço	Distância [km]	Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	Depleção da camada de ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificação [kg SO ₂ eq]	Eutrofização da água doce [kg P eq]	Eutrofização marinha [kg N eq]	Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	Emissão de partículas [kg PM10 eq]	Depleção abiótica [kg Sb eq]	Energia primária de recursos não renováveis [MJ _F]
B (aço)	0	1,38	6,62E-08	5,16E-03	8,07E-05	1,65E-04	5,17E-03	3,82E-03	1,30E-02	25,63
	100000	9,20	1,16E-06	1,98E-02	9,62E-05	4,96E-04	2,10E-02	8,44E-03	6,31E-02	139,76
	200000	17,03	2,26E-06	3,45E-02	1,12E-04	8,28E-04	3,69E-02	1,31E-02	1,13E-01	253,90
	300000	24,85	3,36E-06	4,91E-02	1,27E-04	1,16E-03	5,28E-02	1,77E-02	1,63E-01	368,03
J (plástico)	0	1,61	1,08E-07	6,48E-03	5,26E-05	1,83E-04	5,51E-03	2,37E-03	1,62E-02	35,70
	100000	7,83	9,81E-07	1,81E-02	6,49E-05	4,47E-04	1,81E-02	6,03E-03	5,60E-02	126,40
	200000	14,05	1,85E-06	2,98E-02	7,72E-05	7,10E-04	3,07E-02	9,70E-03	9,59E-02	217,09
	300000	20,26	2,73E-06	4,14E-02	8,96E-05	9,73E-04	4,34E-02	1,34E-02	1,36E-01	307,79

Tabela Ap. 8. Comparação do desempenho ambiental do ciclo de vida por apoio de braço novos modelos através dos métodos ReCiPe, CML 2001 e CED.

Apoio de braço	Distância [km]	Alterações climáticas [kg CO ₂ eq]	Depleção da camada de ozono [kg CFC-11 eq]	Acidificação [kg SO ₂ eq]	Eutrofização da água doce [kg P eq]	Eutrofização marinha [kg N eq]	Oxidação fotoquímica [kg NMVOC]	Emissão de partículas [kg PM ₁₀ eq]	Depleção abiótica [kg Sb eq]	Energia primária de recursos não renováveis [MJ _p]
B1	0	1,24	7,96E-08	4,92E-03	4,12E-05	1,32E-04	4,13E-03	1,83E-03	1,26E-02	27,80
	100000	6,29	7,90E-07	1,44E-02	5,13E-05	3,47E-04	1,44E-02	4,82E-03	4,50E-02	101,56
	200000	11,35	1,50E-06	2,39E-02	6,13E-05	5,61E-04	2,47E-02	7,80E-03	7,74E-02	175,33
	300000	16,41	2,21E-06	3,33E-02	7,13E-05	7,75E-04	3,49E-02	1,08E-02	1,10E-01	249,09
B2	0	0,99	6,34E-08	3,91E-03	3,35E-05	1,06E-04	3,31E-03	1,50E-03	1,00E-02	22,03
	100000	5,06	6,35E-07	1,15E-02	4,15E-05	2,78E-04	1,16E-02	3,90E-03	3,61E-02	81,44
	200000	9,13	1,21E-06	1,92E-02	4,96E-05	4,51E-04	1,98E-02	6,30E-03	6,22E-02	140,85
	300000	13,20	1,78E-06	2,68E-02	5,77E-05	6,24E-04	2,81E-02	8,70E-03	8,83E-02	200,26
B3	0	0,75	3,46E-08	2,97E-03	2,53E-05	8,98E-05	2,94E-03	1,19E-03	8,46E-03	18,80
	100000	4,29	5,32E-07	9,60E-03	3,23E-05	2,40E-04	1,01E-02	3,28E-03	3,12E-02	70,48
	200000	7,83	1,03E-06	1,62E-02	3,93E-05	3,90E-04	1,73E-02	5,37E-03	5,38E-02	122,16
	300000	11,37	1,53E-06	2,29E-02	4,63E-05	5,40E-04	2,45E-02	7,46E-03	7,65E-02	173,84