



Avaliação do Ciclo de Vida de elemento de proteção rodoviária produzido com reutilização de borracha de pneu

INÊS SORAIA BRITES RIBEIRO

Novembro de 2020

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE ELEMENTO DE PROTEÇÃO RODOVIÁRIA PRODUZIDO COM REUTILIZAÇÃO DE BORRACHA DE PNEU

Inês Soraia Brites Ribeiro

1171502

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE ELEMENTO DE PROTEÇÃO RODOVIÁRIA PRODUZIDO COM REUTILIZAÇÃO DE BORRACHA DE PNEU

Inês Soraia Brites Ribeiro

1171502

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação de Nídia de Sá Caetano.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutora Nídia de Sá Caetano
Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutora Helena Isabel Pereira Monteiro
Investigadora, Low Carbon & Resource Efficiency, R&Di, Instituto de Soldadura e
Qualidade

Arguente

Professora Maria Isabel da Silva Nunes
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

AGRADECIMENTOS

Eu quero agradecer a oportunidade de aprender, desenvolver os meus conhecimentos e crescer como profissional na comunidade do Instituto Superior de Engenharia do Porto e do Instituto de Soldadura e Qualidade. Foi um prazer enorme poder participar no projeto *Safety4Road* e prestar o meu contributo para o mundo da inovação e do ambiente.

Quero expressar a minha profunda gratidão à minha supervisora de estágio e coorientadora, Doutora Helena Monteiro, pelo seu contínuo apoio e interesse, pelos seus conselhos e pelo privilégio de partilhar as suas visões comigo.

À minha orientadora, Doutora Nídia Caetano, por acreditar em mim, pelo apoio e por me acompanhar nessa caminhada.

Aos meus pais, António Ribeiro e Luísa Brites, pelo amor e apoio incondicional nas minhas lutas e vitórias. À minha irmã, Daniela Ribeiro, que esteve presente em todos os momentos.

A todos que passaram pelo meu caminho, que participaram no meu crescimento como pessoa e profissional, os meus sinceros agradecimentos.

A Prof.^a Nídia de Sá Caetano, orientadora desta dissertação, é membro integrado do LEPABE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado pela Unidade de Investigação UID/EQU/00511/2020 - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia – LEPABE - financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

A Dra. Helena Monteiro, coorientadora desta dissertação, é investigadora do ISQ, Instituto de Soldadura e Qualidade, financiado por fundos nacionais através do Financiamento Plurianual de Base e Reforço dos Recursos Humanos dos Centros Interface, do Fundo de Inovação, Tecnologia e Economia Circular (FITEC).

Esta dissertação foi realizada no âmbito do Projeto em copromoção nº038326 – “*Safety4Road – Application of hybrid ecological materials to improve road safety*” financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Portugal-2020 – Programa Operacional da Região de Lisboa (LISBOA-01-0247-FEDER-038326), tendo sido também apoiada pelo do projeto nº 810764 do programa de investigação e inovação da União Europeia, Horizonte 2020.

PALAVRAS CHAVE

Avaliação de ciclo de vida; Elementos de proteção rodoviária; Granulado de borracha de pneu; Pneu em fim-de-vida; Pneus usados

RESUMO

Este estudo teve como objetivo a avaliação de impacto ambiental de um elemento de proteção rodoviária produzido a partir de uma matriz termoplástica que incorpore borracha vulcanizada de pneu em fim de vida.

O elemento de proteção rodoviário em estudo, em desenvolvimento no âmbito do projeto *Safety4Road*, é um perfil protetor de revestimento de prumos verticais de sustentação dos *rails* rodoviários e visa mitigar os danos associados à colisão de motociclistas com estas estruturas. Este perfil será fabricado através de extrusão de uma matriz termoplástica com granulado de borracha de pneu (GBP) em fim-de-vida, sendo a sua geometria definida por parceiros do projeto *Safety4road* com base em estudos preliminares de otimização. No processo de otimização deste perfil foram consideradas duas misturas alternativas com diferentes proporções de granulado de borracha de pneu (GBP) e polipropileno (PP): a mistura A, com 55% de borracha GBP e 45% de PP, e a mistura B com 70% de borracha GBP e 30% PP.

Neste trabalho aplicou-se a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para caracterizar os impactos ambientais de ciclo de vida do perfil produzido com as duas misturas alternativas e assim informar e apoiar a decisão, identificando a mistura com menor impacto ambiental. A unidade funcional utilizada foi um perfil de proteção rodoviária com 395 mm de altura e um volume de 0,01889 m³.

Adicionalmente, com o objetivo de analisar os benefícios e impactos da incorporação de materiais reciclados ou convencionais na produção do perfil, foram avaliados também cenários teóricos para o perfil com misturas de borracha e PP equivalentes às anteriores:

- a) um cenário considerou duas misturas constituídas por materiais convencionais (não reciclados): a mistura C com 55% de borracha virgem e 45% PP e a mistura D com 70% borracha virgem e 30% PP;
- b) outro cenário em que as duas misturas eram constituídas por materiais reciclados: a mistura E com 55% GBP e 45% PP reciclado (PPR) e a mistura F com 70% GBP e 30% PPR.

O método de avaliação de impacto aplicado foi o ReCiPe e a análise foi realizada considerando categorias de *midpoint* (Aquecimento Global (AG), Depleção de ozono estratosférico (DOE), Radiação Ionizante (RI), Formação de partículas (FP), Formação de Ozono (FO), Acidificação Terrestre (AT), Eutrofização de Água Doce (EAD), Eutrofização Marinha (EM), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade (ET), Ocupação dos Solos (OS), Depleção de Recursos Minerais (DRM) e Depleção de Recursos Fósseis (DRF)), assim como 3 categorias *endpoint* (saúde humana, meio-ambiente e depleção de recursos). O inventário de ciclo de vida foi elaborado partindo de dados primários do perfil, dados secundários da literatura e informação da base de dados de impacto ambiental *ecoinvent* 3.6. Neste estudo conclui-se que a mistura B (que incorpora uma maior proporção de GBP) apresenta menos impactos ambientais do que a mistura A. Mais especificamente, a mistura B apresenta 1,8-23% de redução de impactos ambientais (*midpoint*), em dez categorias de impacto (AG, FO, FP, AT, EM, ET, TH, DRF, DRM e CA), especialmente nas categorias AG, FO, ET e DRF em que a redução é superior a 14,8%. Do mesmo modo, B apresenta menos 12,4-25,5% danos ambientais (*endpoint*) do que a mistura A em todas as categorias de dano. Tal justifica-se porque o uso de GBP tem menos impacto ambiental do que o PP nessas categorias.

Os resultados também mostraram que a incorporação de GBP permite reduzir entre 7,24-87,48% os impactos ambientais (*midpoint*) em todas as categorias de impacto ambiental, com reduções superiores a 38,60% em quase todas as categorias de impacto (exceto OS) e reduzir também entre 38,40-63,43% em todas as categorias de dano ambiental (*endpoint*) quando comparado com perfis produzidos com as misturas com borracha sintética.

Por último, dado o impacto incorporado no PP, os resultados também sugerem que a utilização conjunta de GBP e de PP reciclado permite reduzir entre 8,28-87,68% os impactos ambientais (*midpoint*) do perfil em quase todas as categorias de impacto (exceto EM), especialmente nas categorias de impacto: AG, DOE, RI, FO, FP, AT, EAD, ET, DRM, DRF e CA, cujas reduções foram superiores a 43,49%, e reduzir entre 63,87-93,13% os danos ambientais (*endpoint*) gerados face ao perfil produzido com materiais convencionais (de borracha virgem e PP virgem).

KEYWORDS

End-of-life tyres; Life Cycle Assessment; Road protection elements; Tyre rubber granulates; Used tyres

ABSTRACT

This study aimed to assess the environmental impact of a road protection element produced from a thermoplastic matrix that incorporates vulcanized rubber of end of life tyre.

The road protection element under study, under development of the scope of the Safety4Road project, is a protective coating profile for vertical props to support road rails and aims to mitigate the damage associated with the collision of motorcyclists with these structures. This profile will be manufactured by extruding a thermoplastic matrix with end-of-life tyre rubber granules (TRG), being its geometry defined by safety4road project partners based on preliminary optimization studies. In the process of optimizing this profile, two alternative mixtures with different proportions of tyre rubber granules (TRG) and polypropylene (PP) were considered: profile A with 55% rubber TRG and 45% PP and profile B 70% TRG rubber and 30% PP.

In this work, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology was applied to characterize the environmental impacts of the life cycle of the profile produced with the two alternative mixtures and thus inform and support the decision, identifying the mixture with the least environmental impact. The functional unit used was a road protection profile 395mm high and a volume of 0.01889 m³.

Additionally, in order to analyze the benefits and impacts of incorporating recycled or conventional materials in the production of the profile, theoretical scenarios for the profile with mixtures of Rubber and PP equivalent to the previous ones were also evaluated:

- a) a scenario considered two mixtures consisting of conventional materials (not recycled): mixture C with 55% virgin rubber and 45% PP and mixture D with 70% virgin rubber and 30% PP;*
- b) another scenario in which the two mixtures consisted of recycled materials: mixture E with 55% GBP and 45% recycled PP (PPR) and mixture F with 70% GBP and 30% PPR.*

The impact assessment method applied was ReCiPe and the analysis was performed, considering midpoint categories (Global Warming (AG), Stratospheric ozone depletion (DOE), Ionizing Radiation (IR), Particle formation (FP), Ozone Formation (FO), Terrestrial Acidification (AT), Fresh Water Eutrophication (EAD), Marine Eutrophication (EM), Human Toxicity (TH), Ecotoxicity (ET), Land use (OS), Mineral Resource scarcity (DRM) and Fossil Resources scarcity (DRF)) as well as three endpoint categories (human health, natural environment, and resource depletion). The life cycle inventory was prepared based on primary profile data, secondary data from the literature and information from the ecoinvent 3.6 environmental impact database. In this study, it is concluded that mixture B (which incorporates a higher proportion of TRG) has less environmental impacts than mixture A. More specifically, mixture B presents 1.8-23% reduction in environmental impacts (midpoint), in ten impact categories (AG, FO, FP, AT, EM, ET, TH, DRF, DRM and CA), especially in the AG, FO, ET and DRF categories where the reduction is greater than 14.8%. Likewise, B presents 12.4-25.5% less environmental damage (endpoint) than mixture A in all damage categories. This is justified because the use of TRG has less environmental impact than PP in these categories.

The results also showed that the incorporation of TRG allows to reduce environmental impacts (midpoint) between 7.24-87.48% in all categories of environmental impact, with reductions above 38.60% in almost all categories of impact (except OS) and also reduce between 38.40-63.43% in all categories of environmental damage (endpoint) when compared to profiles produced with mixtures with synthetic rubber.

Finally, given the impact incorporated in the PP, the results also suggest that the joint use of TRG and recycled PP reduces between 8.28-87.68% the environmental impacts (midpoint) of the profile in almost all impact categories (except EM), especially in the impact categories: AG, DOE, RI, FO, FP, AT, EAD, ET, DRM, DRF and CA, whose reductions were greater than 43.49%, and reduce between 63.87-93.13% the environmental damage (endpoint) generated compared to the profile produced with conventional materials (virgin rubber and virgin PP).

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Termo	Designação
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AG	Aquecimento Global
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
AT	Acidificação Terrestre
BS	Borracha Sintética
CA	Consumo de Água
DOE	Depleção de Ozono Estratosférico
DR	Depleção de Recursos
DRF	Depleção de Recursos Fósseis
DRM	Depleção de Recursos Minerais
EAD	Eutrofização de Água Doce
EM	Eutrofização Marinha
EPDM	<i>Ethylene Propylene Diene Monomer</i>
ET	Ecotoxicidade
EU	União Europeia
FA	<i>Franklin Associates</i>
FO	Formação de Ozono
FP	Formação de partículas
GBP	Granulado de borracha de pneu
MA	Meio-ambiente
OS	Ocupação dos solos
PA	Potencial de Acidificação
PE	Potencial de Eutrofização
PP	Polipropileno
PPR	Polipropileno
RI	Radiação Ionizante
SH	Saúde Humana
TH	Toxicidade Humana

Lista de Unidades

Unidade	Designação
DALY	<i>Disability Adjusted Life Years</i>
kBq Co-60	Quilobecquerel de Cobalto
kg	Quilograma
kg 1,4 – DCB	Quilograma de Diclorobenzeno
kg CFC – 11	Quilograma de clorofluorcarbonetos
kg CO ₂ eq	Quilograma de dióxido de carbono
kg Cu	Quilograma de cobre
kg N	Quilograma de Azoto
kg NO _x	Quilograma de óxidos de azoto
kg oil	Quilograma de petróleo
kg P	Quilograma de fósforo
kg PM2.5	Quilograma de matéria particulada
kg SO _x	Quilograma de óxidos de enxofre
km	Quilómetros
kWh	Quilowatt hora
m ² a crop eq	Metro quadrado de área equivalente
m ³	Metros cúbicos
Species.yr	Espécies x ano
t	Tonelada
USD2013	<i>United States Dollars for 2013</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - OS TRÊS PILARES DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (PEREIRA, 2009)	7
FIGURA 2 - PROCESSO DE RECICLAGEM MECÂNICA (AMORIM DA SILVA, 2011)	13
FIGURA 3 - PROCESSO CRIOGÉNICO (AMORIM DA SILVA, 2011)	14
FIGURA 4 - FASES DE UM ESTUDO DE ACV, DE ACORDO COM A NORMA ISO 14040:2006 (IPQ, 2006)	26
FIGURA 5 – ESTRUTURA DO PRODUTO DO CASO DE ESTUDO	27
FIGURA 6 - FRONTEIRA DOS DIFERENTES CENÁRIOS	29
FIGURA 7 - RESULTADOS DAS CATEGORIAS AMBIENTAIS EM MIDPOINT	46
FIGURA 8 - RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE DANO <i>ENDPOINT</i>	48
FIGURA 9 – REPARTIÇÃO DOS DANOS DA CATEGORIA SAÚDE HUMANA EM SUBCATEGORIAS.....	49
FIGURA 10 - RESULTADOS DA SUBCATEGORIA AG DA CATEGORIA SH	50
FIGURA 11 - RESULTADOS DA SUBCATEGORIA FP DA CATEGORIA SH	51
FIGURA 12 - RESULTADOS DA CATEGORIA MEIO-AMBIENTE EM SUBCATEGORIAS	52
FIGURA 13 - RESULTADOS DA SUBCATEGORIA AG, ECOSSISTEMA TERRESTRE, DA CATEGORIA MA	53
FIGURA 14 - RESULTADOS DA CATEGORIA DEPLEÇÃO DE RECURSOS EM SUBCATEGORIAS	54
FIGURA 15 - RESULTADOS DA SUBCATEGORIA DRF DA CATEGORIA DR	54
FIGURA 16 - RESULTADOS <i>MIDPOINT</i> EM PERCENTAGEM DAS MISTURAS DO CENÁRIO BASE	56
FIGURA 17 - RESULTADOS <i>MIDPOINT</i> EM PERCENTAGEM DAS MISTURAS DO CENÁRIO 2.....	57
FIGURA 18 - RESULTADOS <i>MIDPOINT</i> EM PERCENTAGEM DAS MISTURAS DO CENÁRIO 3.....	58
FIGURA 19 - RESULTADOS <i>ENDPOINT</i> EM PERCENTAGEM DAS MISTURAS A E B DO CENÁRIO 1	60
FIGURA 20 - RESULTADOS <i>ENDPOINT</i> EM PERCENTAGEM DAS MISTURAS C E D DO CENÁRIO 2	61
FIGURA 21 - RESULTADOS <i>ENDPOINT</i> DAS MISTURAS E E F DO CENÁRIO 3, EM PERCENTAGEM	62

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DE PNEUS LIGEIOS E PESADOS (VALORPNEU, 2018)	8
TABELA 2 – ESTUDOS DE DIFERENTES FORMAS DE VALORIZAÇÃO DE PNEU EM FIM DE VIDA E RESPETIVOS AUTORES	15
TABELA 3 - PROPORÇÕES DAS MISTURAS ALTERNATIVAS CONSIDERADAS PARA O PRODUTO EM CADA CENÁRIO	28
TABELA 4 – ORIGEM DOS DADOS UTILIZADOS NO CASO DE ESTUDO	31
TABELA 5 - LISTA DE DADOS DA <i>ECOINVENT 3.6</i> UTILIZADOS NO ESTUDO DE ACV	32
TABELA 6 - DISTÂNCIAS DE TRANSPORTAÇÃO DE MATERIAIS	34
TABELA 7 - DADOS DE INVENTÁRIO PARA A PRODUÇÃO DE GBP	34
TABELA 8 - DADOS DE INVENTÁRIO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO	34
TABELA 9 – CATEGORIAS DE IMPACTO <i>MIDPOINT</i>	37
TABELA 10 - RESULTADOS OBTIDOS PELO RECIPE	44
TABELA 11 - RESULTADOS DAS CATEGORIAS DE DANO AMBIENTAL	48
TABELA 12 - CONTRIBUIÇÃO DE DANOS AMBIENTAIS DAS SUBCATEGORIAS AG E FP DA CATEGORIA SH	49
TABELA 13 – RESULTADOS EM PERCENTAGEM DAS PRINCIPAIS FASES CONTRIBUIDORAS DE DANO NA SUBCATEGORIA AG DE SH	50
TABELA 14 - RESULTADOS EM PERCENTAGEM DAS PRINCIPAIS FASES CONTRIBUIDORAS DE DANO NA SUBCATEGORIA FP DE SH	51
TABELA 15 - RESULTADOS EM PERCENTAGEM DA SUBCATEGORIA AG, ECOSSISTEMA TERRESTRE DE MA	52
TABELA 16 - RESULTADOS EM PERCENTAGEM DAS PRINCIPAIS FASES CONTRIBUIDORAS DE IMPACTO NA SUBCATEGORIA AG, ECOSSISTEMA TERRESTRE DE MA	53
TABELA 17 - RESULTADOS EM PERCENTAGEM DAS PRINCIPAIS FASES CONTRIBUIDORAS DE DANO NA SUBCATEGORIA DRF DE DR	55
TABELA 18 - PERCENTAGEM DE REDUÇÃO DE IMPACTO OFERECIDA PELA MISTURA B FACE À MISTURA A, <i>MIDPOINT</i>	56
TABELA 19 - PERCENTAGEM DE REDUÇÃO DE IMPACTO OFERECIDA PELA MISTURA A FACE À MISTURA B, <i>MIDPOINT</i>	57
TABELA 20 - PERCENTAGEM DE BENEFÍCIO AMBIENTAL OFERECIDO PELA MISTURA C FACE À MISTURA D, <i>MIDPOINT</i>	58
TABELA 21 - PERCENTAGEM DE BENEFÍCIO AMBIENTAL OFERECIDO PELA MISTURA E FACE À MISTURA F, <i>MIDPOINT</i>	59
TABELA 22 - PERCENTAGEM DE BENEFÍCIO AMBIENTAL OFERECIDO PELA MISTURA F FACE À MISTURA E, <i>MIDPOINT</i>	59
TABELA 23 - RESULTADOS <i>ENDPOINT</i> EM PERCENTAGEM DAS MISTURAS A E B DO CENÁRIO 1	60

TABELA 24 - BENEFÍCIO AMBIENTAL EM PERCENTAGEM QUE A MISTURA C OFERECEU EM RELAÇÃO À MISTURA D	61
TABELA 25 - BENEFÍCIO AMBIENTAL EM PERCENTAGEM QUE A MISTURA E OFERECEU EM RELAÇÃO À MISTURA F	62
TABELA 26 – RESULTADOS <i>MIDPOINT</i> DA REDUÇÃO DE IMPACTO ORIGINADA PELAS MISTURAS DO CENÁRIO 1 FACE AO CENÁRIO 2	63
TABELA 27 - RESULTADOS <i>MIDPOINT</i> DA REDUÇÃO DE IMPACTO OFERECIDA POR E FACE A A E B	64
TABELA 28 - RESULTADOS <i>MIDPOINT</i> DA REDUÇÃO DE IMPACTO OFERECIDA PELAS MISTURAS DO CENÁRIO 3 FACE CENÁRIO 1	65
TABELA 29 - RESULTADOS <i>MIDPOINT</i> DA REDUÇÃO DE IMPACTO OFERECIDA PELAS MISTURAS DO CENÁRIO 3 FACE AO CENÁRIO 2	66
TABELA 30 - RESULTADOS <i>ENDPOINT</i> DA REDUÇÃO DE DANO OFERECIDA PELAS MISTURAS DO CENÁRIO 1 FACE AO CENÁRIO 2	67
TABELA 31 - RESULTADOS <i>ENDPOINT</i> DA REDUÇÃO DE DANO OFERECIDA PELAS MISTURAS DO CENÁRIO 3 FACE AO CENÁRIO 1	68
TABELA 32 - RESULTADOS <i>ENDPOINT</i> DA REDUÇÃO DE DANO OFERECIDA PELAS MISTURAS DO CENÁRIO 3 FACE AO CENÁRIO 2	68

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO E CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVO E ÂMBITO.....	2
1.3	ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2	ESTADO DE ARTE	7
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ECONOMIA CIRCULAR	7
2.2	IMPACTO AMBIENTAL ASSOCIADO AO FIM DE VIDA DE PNEUS.....	8
2.3	SISTEMA DE GESTÃO DE PNEUS USADOS	9
2.3.1	PANORAMA DO SISTEMA DE GESTÃO DE PNEUS USADOS A NÍVEL EUROPEU	9
2.3.2	PANORAMA DA GESTÃO DE PNEUS USADOS EM PORTUGAL	10
2.4	VALORIZAÇÃO DE PNEUS USADOS.....	11
2.5	REVISÃO DE LITERATURA	14
3	AValiação DE CICLO DE VIDA DE PERFIL DE PROTEÇÃO RODOVIÁRIA	25
3.1	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO	26
3.1.1	UNIDADE FUNCIONAL	28
3.1.2	FRONTEIRA DO SISTEMA	28
3.1.2.1	PROCESSOS INCLUÍDOS.....	30
3.1.2.2	PROCESSOS EXCLUÍDOS	30
3.2	INVENTÁRIO	31
3.2.1	CONSIDERAÇÕES E PRESSUPOSTOS	32
3.2.2	ANÁLISE DE INVENTÁRIO.....	33
3.3	AValiação DE IMPACTO AMBIENTAL.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43

4.1	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DE CADA MISTURA	43
4.1.1	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS EM <i>MIDPOINT</i>	43
4.1.2	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS EM <i>ENDPOINT</i>	47
4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO.....	55
4.2.1	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MISTURAS DE CADA CENÁRIO.....	55
4.2.1.1	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MISTURAS DE CADA CENÁRIO EM <i>MIDPOINT</i> .	55
4.2.1.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MISTURAS DE CADA CENÁRIO EM <i>ENDPOINT</i> .	60
4.2.2	COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS.....	62
4.2.2.1	COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES CENÁRIOS EM <i>MIDPOINT</i>	63
4.2.2.2	COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES CENÁRIOS EM <i>ENDPOINT</i>	67
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	71
5.1	CONCLUSÕES.....	71
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	73
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	77

INTRODUÇÃO

- 1.1 ENQUADRAMENTO E CONTEXTUALIZAÇÃO
- 1.2 OBJETIVO E ÂMBITO
- 1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E CONTEXTUALIZAÇÃO

O aumento de consciência relativamente à proteção e conservação da natureza, à exploração desmoderada de recursos naturais e às consequências de uma economia linear por eliminação final de resíduos por deposição em aterro suscitou a necessidade de desenvolvimento de estratégias que visassem a sustentabilidade ambiental. O interesse em obter produtos mais sustentáveis ambientalmente e compreender os efeitos ambientais provocados durante o seu ciclo de vida, suscitou o desenvolvimento de metodologias como a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A metodologia ACV é uma ferramenta de gestão ambiental que contempla toda a cadeia de produção de um produto, desde a fase de extração da matéria-prima usada na sua produção até ao momento de descarte, isto é, do berço até ao túmulo (*cradle-to-grave*). Esta metodologia permite analisar e quantificar os impactos ambientais possíveis gerados por um produto, provando ser uma ferramenta adequada e conveniente para desenvolvimento e melhoria de produtos, deteção de áreas de investigação e desenvolvimento, planeamento estratégico, entre outras.

No âmbito do projeto *Safety4Road*, um projeto que visa o desenvolvimento de produtos de segurança rodoviária (*ANI - Agência Nacional de Inovação*, n.d.), foi desenvolvido um estudo de avaliação de impacto ambiental de um produto, com base em princípios de economia circular, para produção de um produto ambientalmente sustentável com utilização de materiais reciclados como a borracha de pneus usados. Este produto é um perfil geometricamente otimizado definido por parceiros do projeto *Safety4Road* com base em estudos preliminares de otimização e que visa revestir os prumos verticais de sustentação de *rails* (amortecendo embates). Este perfil foi otimizado de forma a ser obtido por meio de extrusão de uma matriz termoplástica polimérica de polipropileno (PP) com granulado de borracha de pneu (GBP) em fim-de-vida.

O produto desenvolvido procurou dar resposta à problemática rodoviária dos embates de condutores de motociclos nas extensões das proteções metálicas da rodovia devido a acidentes. Esses embates não só resultavam em danos físicos para os motociclistas como também não impediam o seu deslize para além da extensão. Além disso, resultavam na danificação das estruturas metálicas devido à sua baixa flexibilidade. Deste modo, o produto desenvolvido procurou aumentar a segurança rodoviária, de

forma a conferir maior proteção aos motociclistas e a conferir maior flexibilidade às infraestruturas, através da utilização de material reciclado.

Neste estudo, foi avaliado o desempenho ambiental de duas misturas com proporções diferentes de GBP e PP para constituírem o produto desejado. Uma mistura seria constituída por cerca de 70% de GBP e 30% de PP e a outra mistura seria constituída por cerca de 55% de GBP e 45% de PP. Com a utilização da metodologia de ACV foram avaliados os desempenhos ambientais destas duas misturas e comparados, para identificar qual a composição mais favorável ambientalmente para constituir este perfil protetor.

Adicionalmente, foram considerados dois cenários teóricos com objetivo de analisar o potencial de impactos mitigados ou proporcionados por utilização de materiais convencionais ou reciclados na produção do perfil com misturas de borracha e PP equivalentes às proporções anteriores, nomeadamente:

- um cenário que considerou que as duas misturas de proporções diferentes analisadas eram constituídas apenas por material convencional (material não reciclado), borracha sintética (BS) e PP;
- outro cenário que considerou que as duas misturas de proporções diferentes analisadas eram constituídas apenas por material reciclado, GBP e PP reciclado (PPR).

As duas misturas de cada cenário teórico foram analisadas e comparadas com as duas misturas do cenário base, protagonistas do estudo (70% de GBP e 30% PP; 55% de GBP e 45% de PP), com objetivo de analisar e identificar os benefícios e impactos gerados por incorporação de materiais convencionais e materiais reciclados.

O método de avaliação de impacto ambiental aplicado foi o ReCiPe. O inventário de ciclo de vida foi elaborado partindo de dados primários do perfil, dados secundários da literatura e informação da base de dados de impacto ambiental *ecoinvent 3.6*.

1.2 OBJETIVO E ÂMBITO

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto *Safety4Road*, que visou aumentar a segurança rodoviária, e possuiu os seguintes objetivos:

- Analisar o desempenho ambiental de duas misturas de GBP e PP usadas como matéria-prima para constituírem o produto de proteção rodoviária;
- Identificar qual a mistura com o melhor desempenho ambiental para produzir o produto de segurança;
- Proporcionar uma melhor perceção e entendimento sobre os impactos ambientais mitigados e/ou proporcionados relativamente à utilização de materiais reciclados e materiais virgens;

- Identificar riscos/problemas e oportunidades, do ponto de vista ambiental, relativamente às misturas;
- Auxiliar na tomada de decisão de seleção da mistura ambientalmente mais sustentável, para constituição do produto final.

1.3 ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi organizada em seis capítulos e encontra-se estruturada da seguinte forma:

- No capítulo 1 realizou-se uma breve introdução e contextualização da dissertação sobre a temática em que se enquadrou. Seguiu-se a definição do objetivo e âmbito da dissertação e finalmente a sua estrutura/organização;
- No capítulo 2 realizou-se a revisão de conceitos considerados relevantes para o estudo. Apresentou-se a temática do desenvolvimento sustentável e economia circular. Os impactos ambientais associados aos pneus em fim-de-vida foram identificados e abordados. Foi abordado o funcionamento do sistema de gestão de pneus usados a nível nacional e europeu. De seguida foram descritos os processos de valorização de pneus usados e por fim foi realizada uma revisão de literatura de estudos existentes relativamente a processos de tratamento e valorização de pneus em fim-de-vida;
- No capítulo 3 apresenta-se o caso de estudo, tal como os cenários considerados e as suas considerações efetuadas para as avaliações. Foi abordado o método de avaliação de impacto ambiental aplicado.
- No capítulo 4, tendo em conta o método utilizado, apresentam-se e discutem-se os resultados, interpretando-se a ACV realizada.
- No capítulo 5 apresentam-se as conclusões obtidas e os aspetos relevantes identificados na realização do estudo. Finalmente, propõe-se a realização de possíveis trabalhos futuros e temas de interesse.

ESTADO DE ARTE

- 2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ECONOMIA CIRCULAR
- 2.2 IMPACTO AMBIENTAL ASSOCIADO AO FIM DE VIDA DE PNEUS
- 2.3 SISTEMA DE GESTÃO DE PNEUS USADOS
- 2.4 VALORIZAÇÃO DE PNEUS USADOS
- 2.5 REVISÃO DE LITERATURA

2 ESTADO DE ARTE

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E ECONOMIA CIRCULAR

O desenvolvimento sustentável é um modelo de desenvolvimento reconhecido internacionalmente e que alcançou maior relevância em 1987, após a publicação do relatório conhecido como o Relatório de Brundtland – “*Our Common Future*” (Keeble, 1988). Este modelo define que o desenvolvimento só é sustentável se a satisfação das necessidades do presente não comprometer a satisfação das necessidades das gerações futuras (Domingos, 1998).

Este modelo visa que o desenvolvimento da sociedade atual assente essencialmente em três pilares: Económico, Ambiental e Social, conforme demonstrado na Figura 1. É desejável que a interação dinâmica entre estes três pilares esteja em equilíbrio e harmonia. Ambiciona-se que a sociedade reflita e progrida, tornando-se mais justa de forma a combater a desigualdade social e que as atividades económicas se desenvolvam sem comprometer a conservação da natureza (Feio, 2013; Pereira, 2009).

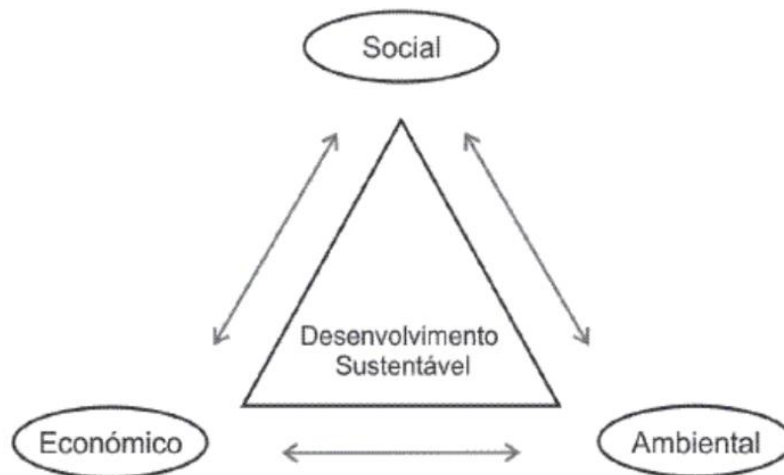


Figura 1 - Os três pilares do desenvolvimento sustentável (Pereira, 2009)

Esta visão levou a que o mundo atual transitasse de um modelo de economia linear (extrair-produzir-consumir-depositar) para um modelo de economia circular, que consiste na valorização material de resíduos que seriam considerados desnecessários e enviados para o aterro, reintroduzindo-os de novo no ciclo, através da reutilização e da

reciclagem. Este modelo contribui para a conservação de recursos naturais e maximiza a utilização de recursos já existentes na economia. De acordo com o Plano de Ação da Comissão Europeia (Comissão Europeia, 2015), “a transição para uma economia mais circular, em que o valor dos produtos, materiais e recursos se mantém na economia durante o máximo de tempo possível e a produção de resíduos se reduz ao mínimo, é um contributo fundamental para o desenvolvimento de uma economia sustentável, hipocarbónica e eficiente em termos de recursos, e competitiva”.

A atual sociedade é consumista, sendo a Europa fortemente dependente das importações de recursos. A transição para uma economia circular possibilita uma menor dependência de abastecimentos instáveis, da volatilidade de preços e permite que não seja necessário extrair e adquirir tantas matérias-primas, valorizar os resíduos e, por conseguinte, combater o desperdício e impactos ambientais associados, contribuindo para a conservação do ambiente (República Portuguesa - Ambiente, 2017). Ao mesmo tempo, a adoção deste modelo cria oportunidades de negócio e inovação, uma vez que, cria necessidade de produtos e serviços que sustentem princípios de economia circular e adicionalmente, novos empregos. Para além disso, contribui para a integração e coesão social (Comissão Europeia, 2015).

2.2 IMPACTO AMBIENTAL ASSOCIADO AO FIM DE VIDA DE PNEUS

Um pneu é um produto circular constituído por vários materiais. Na Tabela 1 encontra-se a composição material de um pneu ligeiro e de um pneu pesado (Valorpneu, 2018).

Tabela 1 - Composição de pneus ligeiros e pesados (Valorpneu, 2018)

Material	Pneu ligeiro	Pneu pesado
Borracha/Elastómeros	47%	45%
Negro de fumo (<i>carbon black</i>)	21,5%	22%
Aço	16,5%	25%
Têxtil	5,5%	-
Óxido de zinco	1%	2%
Enxofre	1%	1%
Aditivos	7,5%	5%

Os pneus em fim-de-vida, enquanto resíduos apresentam a inconveniência de não serem biodegradáveis, devido ao seu tempo de decomposição longo e indeterminado, e ainda pela sua grande ocupação de volume num espaço físico. Além disso, a sua composição inclui elementos perigosos para a saúde humana e para o meio ambiente

como: chumbo, crómio, cádmio e outros metais pesados (Basel Convention & UNEP, 2002). Por estas razões, um pneu, quando descartado impropriamente, apresenta numerosas ameaças para o ambiente e para a saúde humana.

Riscos para a saúde humana

O depósito e o armazenamento de pilhas de pneus expostas ao ar livre permitem armazenar pequenas poças de água das chuvas no seu interior. Esse armazenamento de água por longos períodos é favorável à criação e proliferação de mosquitos, nomeadamente *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*. Nos países tropicais é um problema de elevada relevância, dado que são intermediários de propagações de doenças, nomeadamente dengue, malária ou febre-amarela (The Basel Convention, 2010).

Riscos para o meio-ambiente

A acumulação de pneus usados ao ar-livre potencia a ocorrência de grandes incêndios, dada a sua estrutura, durabilidade e capacidade de retenção de calor (Kurt Reschner, 2008).

Os pneus têm na sua composição materiais tóxicos e inflamáveis: carbono, borracha, benzeno, enxofre, óleo. A ocorrência de ignição de pneus resulta num transtorno grave para o ambiente e a saúde humana devido à formação de compostos gasosos tóxicos, óleos e matéria particulada, oriundas da combustão, contribuindo para a poluição atmosférica, dos solos e dos aquíferos. Os compostos gasosos tóxicos emitidos para a atmosfera são de natureza sulfurosa e por isso contribuem para a ocorrência de chuvas ácidas (MUHAMMAD USMAN RAFIQUE, 2012).

Pelos motivos descritos, a eliminação de pneus em fim de vida por deposição em aterros ou por combustão a céu aberto foram proibidas na Europa pela Diretiva do Conselho 1999/31/CE de 26 de abril.

2.3 SISTEMA DE GESTÃO DE PNEUS USADOS

2.3.1 PANORAMA DO SISTEMA DE GESTÃO DE PNEUS USADOS A NÍVEL EUROPEU

Existe o objetivo europeu de promover a prevenção de resíduos e de maximizar a valorização de resíduos, de forma a impulsionar e promover a economia circular, através da gestão de resíduos integrados no ciclo de vida dos produtos. Para isso, a União Europeia (UE) delineou linhas de orientação para o caminho de desenvolvimento sustentável, utilizando atos legislativos, nomeadamente: as diretivas, os regulamentos e as decisões. Estes atos podem ser vinculativos ou não, como também podem ser aplicáveis a todos os países da UE ou somente a alguns deles. As diretivas são atos legislativos que visam objetivos que todos os Estados-Membros devem alcançar. Os regulamentos são atos legislativos vinculativos e aplicáveis a todos os Estados-

Membros. Já as decisões só são vinculativas para destinatários específicos, ou seja, àqueles a quem se dirige a decisão (Feio, 2013).

A nível europeu, no que diz respeito à gestão de pneus usados, a UE delineou três tipos de sistema (ETRMA, 2011):

i) Responsabilidade do Produtor

A Diretiva n.º 2008/98/CE, de 19 de novembro de 2008, no artigo 8.º, incute a responsabilidade do resíduo ao produtor. O produtor ou introdutor deve acompanhar o bem até à eliminação final no território gerido, criando, desta forma, sistemas de gestão (Silva et al., 2006). Estes sistemas de gestão visam uma hierarquia, conforme o artigo 4.º, do seguinte modo: 1º a prevenção e redução de produção de resíduos; 2º a reutilização do resíduo; 3º a reciclagem; 4º outros tipos de valorização de resíduos; 5º eliminação (Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, 2008). No que diz respeito à deposição de resíduos em aterros, a Diretiva do Conselho 1999/31/CE de 26 de abril, no artigo 5.º, proíbe a deposição de pneus inteiros em aterros, porém não proíbe a sua deposição se estes forem triturados.

ii) Sistema de Taxas

No sistema de taxas, cada país é responsável pela valorização e reciclagem de pneus usados. O sistema é financiado pela adição de um imposto no produtor do pneu, que posteriormente repassa para o cliente. No fundo, é um sistema intermediário, pelo qual os produtores pagam um imposto ao Estado, responsável pela organização em geral e remunerando os gestores da cadeia de valorização.

iii) Sistema de Mercado Livre

No sistema de mercado livre, a legislação define objetivos, porém não são especificadas as responsabilidades, permitindo às empresas operarem de forma individual. As empresas de valorização podem contratar em condições de mercado livre e agir conforme a legislação. Esta ação pode ser realizada em cooperação com outras empresas.

2.3.2 PANORAMA DA GESTÃO DE PNEUS USADOS EM PORTUGAL

A nível nacional, a legislação responsável pelos princípios e normas de gestão de pneus usados é o Decreto-Lei n.º 152-D/2017, de 11 de dezembro (Decreto-Lei n.º 152-D/2017, 2017) e é aplicada a todos os pneus usados. De acordo com a alínea k) do artigo 3.º, um pneu usado é qualquer pneu utilizado em veículos, aeronaves, reboques, velocípedes e outros equipamentos motorizados, de que o respetivo detentor se desfaça ou tenha a intenção ou a obrigação de se desfazer, e que constituam resíduos na aceção de operador no âmbito dos fluxos de resíduos. A responsabilidade pela recolha, transporte e destino final adequado dos pneus usados é da responsabilidade do produtor de pneus, por meio de um sistema de gestão individual ou por uma entidade gestora autorizada

e/ou licenciada, conforme o n.º1 do artigo 7.º e do n.º 2 do artigo 9.º ou do artigo 10.º, respetivamente (APA, 2017).

A entidade para a qual os produtores podem transferir a responsabilidade pela gestão de fluxo de pneus usados é a Valorpneu – Sociedade de Gestão de Pneus Usados (SGPU), Lda. A Valorpneu é uma sociedade licenciada sem fins lucrativos cujo objetivo é a organização e gestão do sistema de recolha e destino final de pneus usados, no quadro do sistema integrado do Decreto-Lei n.º 152-D/2017. A SGPU é um sistema cuja função é o encaminhamento de pneus em fim-de-vida para o devido destino, promovendo a recolha, separação, retoma e valorização (APA, 2017). Este sistema é financiado pela taxa de um ecovalor no momento de venda de pneus (Amorim da Silva, 2011). O ecovalor é um valor imputado na fatura de comercialização de pneus que reverte a favor da entidade gestora. A venda de pneus novos ou usados no mercado nacional requerem contrato com a Valorpneu, para que se possa cobrar o ecovalor respetivo.

2.4 VALORIZAÇÃO DE PNEUS USADOS

Um pneu perde a sua utilidade quando este se encontra deformado ou desgastado. Quando neste estado, o pneu deixa de estar capacitado para exercer a sua função e precisa de ser substituído.

Os pneus, como produtos, são constituídos por vários materiais, como referido anteriormente na seção 2.2. No seu fim de vida, estes podem representar um recurso valioso. Se a estrutura metálica do pneu se encontrar dentro das condições recomendáveis, o pneu pode ser recauchutado, caso contrário, este pode valorizado por meio de valorização material ou valorização energética, de forma a prolongar o seu período de vida.

Os processos de valorização utilizados são:

- Recauchutagem
- Valorização energética
- Valorização material

Recauchutagem

Atendendo à Diretiva n.º 2008/98/CE, de 19 de novembro, e respeitando a hierarquia de gestão referida nesse documento (Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, 2008), a recauchutagem, sempre que possível, deve ser aplicada primeiramente.

A recauchutagem é um processo que consiste no aproveitamento da carcaça do pneu, se esta estiver em bom estado, e na fusão de uma nova borracha de piso (Feio, 2013).

Este processo permite a reutilização de recursos e redução de custos. Quando a recauchutagem não puder ser aplicada, poderá então prosseguir-se para outras formas de valorização, como a reciclagem.

Valorização energética

Existem duas formas de valorização energética. Uma forma de valorização energética é a pirólise, que consiste na reação/decomposição de elementos a temperaturas elevadas em condições de ausência de oxigênio. O tratamento de pneus usados por pirólise resulta na produção de:

- Coque, utilizado como negro de fumo em pneus ou pigmentos de tintas;
- Óleos, utilizado em combustíveis e lubrificantes;
- Gases, hidrogênio e hidrocarbonetos leves;
- Resíduo metálico.

Outra forma de valorização energética consiste na combustão de pneus usados em ambientes controlados, podendo por isso ser um combustível alternativo complementar. A sua queima ao ar-livre é proibida, tal como também é proibida a sua queima sem recuperação energética, conforme descrito na seção n.º 3 do artigo 52.º do Decreto-Lei n.º152-D/2017 (APA, 2017).

As aplicações mais comuns de pneus usados para valorização energética são a utilização de pneus usados como combustível para geração de energia elétrica, para a indústria cimenteira, para a indústria metalúrgica e outras indústrias.

Valorização material

A valorização de material consiste na transformação do pneu usado em granulado de borracha e na sua reutilização. Os granulados de borracha podem ter várias aplicações, nomeadamente em campos de relvado sintético, betume modificado para pavimentos rodoviários, pisos de parques infantis, produtos moldados, entre outros.

Durante este processamento são gerados subprodutos, como o metal e as fibras têxteis. O metal pode ser vendido a empresas de processamento de metais e as fibras têxteis podem ser depositadas em aterros ou valorizadas energeticamente (Feio, 2013).

O processo de transformação do pneu usado em granulado de borracha pode ser realizado por meio de reciclagem mecânica ou reciclagem criogénica.

Processo de reciclagem mecânica

O processo de reciclagem mecânica, que também é conhecido como reciclagem a temperatura ambiente. Este processo consiste na trituração e granulação dos pneus usados. O processo consiste na diminuição das dimensões do pneu usado para grânulos, através da trituração. Os grânulos podem estar sujeitos a mais do que uma trituração, dependendo do diâmetro desejável. O aço e as fibras são separados. No final do

processo, é obtido granulado de borracha que é separado consoante a sua granulometria (Amorim da Silva, 2011; Kløverpris & Schmidt, 2009b).

Na Figura 2 encontram-se esquematizadas as fases de processamento da reciclagem mecânica de pneus usados para obtenção de grânulos de borracha.

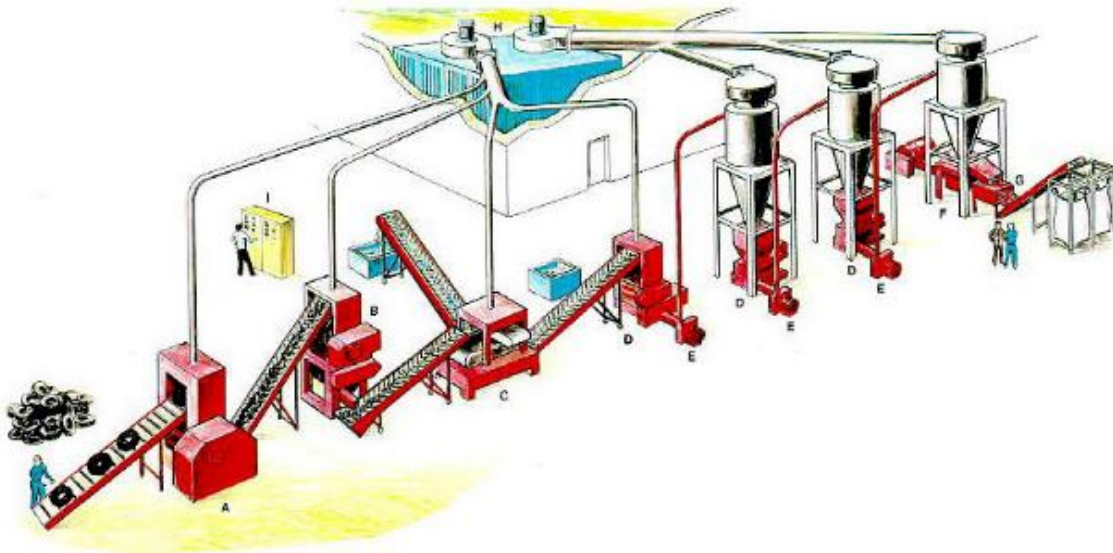


Figura 2 - Processo de reciclagem mecânica (Amorim da Silva, 2011)

Legenda da Figura 2: A - Triturador primário; B - Granulador; C - Separador de aço e fibras; D- Consecutivos passos de moagem fina; E - Sistema de transportadores pneumáticos; F - Sopradores; G - Separador magnético; H - Ciclones (remoção da fibra e pó) (Amorim da Silva, 2011).

Processo de reciclagem criogénica

O processamento criogénico consiste no congelamento da borracha a $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ num túnel criogénico.

Primeiramente o pneu é triturado mecanicamente e de seguida os seus fragmentos são transportados para o túnel criogénico, onde a temperatura de entrada de azoto é aproximadamente $-192\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a temperatura de saída da borracha é de cerca de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. No final da passagem pelo túnel criogénico e pelos martelos pneumáticos, o aço e as fibras têxteis são separadas magneticamente e por aspiração, respetivamente.

Na Figura 3 encontram-se ilustradas as fases de processamento da reciclagem criogénica de pneus usados para obtenção de grânulos de borracha.

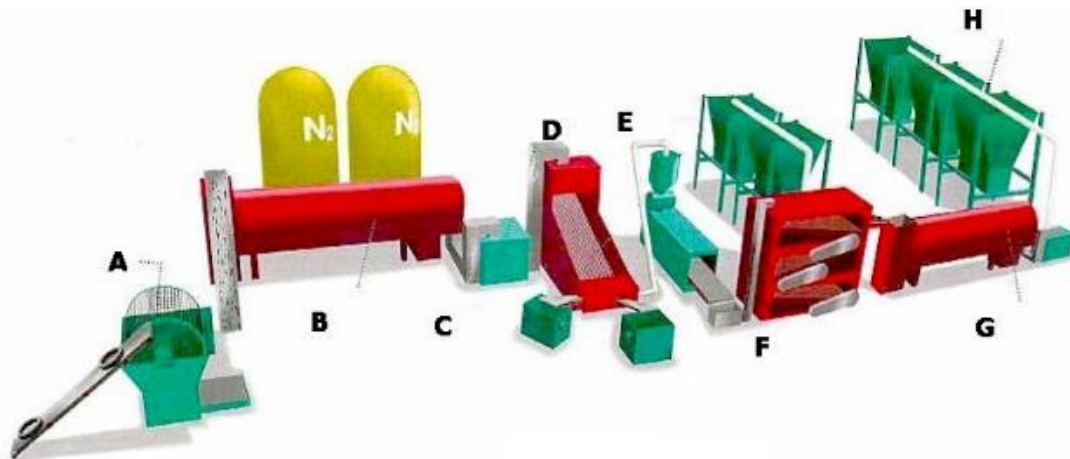


Figura 3 - Processo criogénico (Amorim da Silva, 2011)

Legenda da Figura 3: A – Triturador primário; B – Túnel de refrigeração; C – Moinhos de martelos; D - Separador de aço e fibras; E - Secador; F - Crivagem; G – Moagem fina; H – Silos de armazenamento de granulado.

2.5 REVISÃO DE LITERATURA

É importante compreender o comportamento ambiental associado ao ciclo de vida de produtos. A metodologia de avaliação de ciclo de vida permite realizar uma abordagem para melhor compreensão do desempenho ambiental relativamente ao ciclo de vida de um produto.

O estudo desenvolvido teve o objetivo de analisar o desempenho ambiental de dois produtos para proteção rodoviária constituídos por borracha vulcanizada de pneu em fim de vida em proporções diferentes, misturados com uma matriz termoplástica de polipropileno, com a finalidade de determinar qual o produto com a proporção mais favorável ambientalmente.

Relativamente à avaliação de ciclo de vida da valorização de pneus usados, existem vários estudos de ACV desenvolvidos nos últimos anos. Foi observado na revisão de literatura que vários estudos ACV incidiram na análise de tecnologias de tratamento de valorização do material do pneu usado, nomeadamente por processos de tratamento de pneus em fim de vida por meio de reciclagem mecânica, reciclagem criogénica e valorização energética. Também foram encontrados outros estudos na literatura que incidiram na avaliação de várias aplicações da utilização da borracha de pneu para outros fins, nomeadamente utilização da borracha do pneu em forma de granulado para aplicações de engenharia civil (Fiksel et al., 2011; Kløverpris & Schmidt, 2009b), moldagem de produtos (Clauzade et al., 2010; Fiksel et al., 2011), relvados sintéticos (Clauzade et al., 2010; Johansson, 2018; Kløverpris & Schmidt, 2009b) e outras opções de aplicação por meios de processos de reciclagem.

Os estudos encontrados permitiram obter conhecimento e informações importantes relativamente aos diferentes tratamentos e processos de aplicação de valorização de pneus em fim-de-vida, bem como também permitiram conhecer os impactos ambientais e as reações do meio ambiente face a essas atividades em diferentes fases do ciclo de vida em diferentes realidades geográficas. Os casos de estudo considerados basearam-se na metodologia de ACV em conformidade com as prescrições metodológicas desenvolvidas nas normas ISO 14040 e ISO 14044.

A Tabela 2 apresenta resumidamente os estudos encontrados na literatura e realizados por vários autores que estudaram diferentes aplicações de valorização de pneus em fim-de-vida.

Tabela 2 – Estudos de diferentes formas de valorização de pneu em fim de vida e respetivos autores

Artigos	Valorização energética	Engenharia Civil	Outras aplicações de reciclagem	Recauchutagem
(Praticò et al., 2020)		7		
(Djadouni et al., 2019)		8		
(Piotrowska et al., 2019)			13	
(Puccini et al., 2019)			14	
(Bressi et al., 2019)			14	
(Bressi et al., 2018)			14	
(Neri et al., 2018)		1		
(Johansson, 2018)		7	15	
(Cao et al., 2017)		7		
(Maxineasa et al., 2017)		9		
(Farina et al., 2017)		7		
(Ortiz-Rodríguez et al., 2017)	3		14; 17	22
(Sun et al., 2016)			13	
(Rodríguez-Alloza et al., 2015)		7		
(Banar, 2015)	1			
(W. Li et al., 2014)			13	
(Farina et al., 2014)		7		
(Yu et al., 2014)		7		
(Simões et al., 2013)			20	
(Feraldi et al., 2013)	3		14	
(Aranda Uson et al., 2012)	3; 4		15; 16	

Artigos	Valorização energética	Engenharia Civil	Outras aplicações de reciclagem	Recauchutagem
(Fiksel et al., 2011)	2; 3; 6	8	14; 15;	22
(X. Li et al., 2010)	1		13	
(Clauzade et al., 2010)	2; 3; 4; 5; 6	10; 11	15;16; 19	
(Kløverpris & Schmidt, 2009a)		12	14; 15	
(Kløverpris & Schmidt, 2009b)	3		14; 15;	
(Ferrão et al., 2008)	2; 3		13	22
(Moral et al., 2004)			18	
(Corti & Lombardi, 2004)	2; 3		21	

Legenda:

Valorização energética: 1-Pirólise; 2-Incineração para geração de energia elétrica; 3-Incineração em indústrias cimenteira; 4- Indústrias metalúrgicas; 5- aquecimento urbano; 6 – Caldeiras industriais;

Engenharia civil: 7-Pavimentos rodoviários de asfalto; 8-camadas de enchimento; 9-Misturas de concreto; 10- bacias de retenção; 11- bacias de infiltração; 12- camadas de drenagem;

Outras aplicações de reciclagem: 13- Produção de granulado de borracha de pneu; 14- Produção/modificação de asfalto; 15- relvados artificiais; 16- moldação de produtos; 17- pisos/tapetes artificiais; 18-cobertura de barreiras rodoviárias; 19-pisos equestres; 20- estruturas de suporte; 21- Preenchimento de materiais;

Recauchutagem: 22 – Recauchutagem.

No que diz respeito aos processos de tratamento de pneus usados, existem estudos de ACV que analisaram o desempenho ambiental desses processos, bem como também realizaram um estudo comparativo entre eles.

Com a proibição de deposição de pneus usados em aterros pela Diretiva 1999/31/CE, de 26 de Abril de 1999, relativamente à deposição de resíduos em aterro (Conselho da União Europeia, 1999), Corti & Lombardi, (2004) realizaram um estudo ACV para avaliação e comparação de diferentes formas de tratamento de pneus usados. As formas de tratamento consideradas diziam respeito à fase de produção de granulado de pneu para reciclagem e valorização energética. A produção de granulado de borracha de pneu foi realizada por meio de reciclagem mecânica e por meio de reciclagem criogénica. Na valorização energética, foram considerados os processos de combustão convencional para geração de energia elétrica e a substituição do combustível comum utilizado na

combustão de indústrias cimenteiras por granulado de pneus usados. A unidade funcional considerada nesse estudo foi uma tonelada de pneus em fim-de-vida. O método de avaliação de impacto ambiental (ferramenta que apresenta quantitativamente os impactos ambientais) utilizado foi o *Eco-Indicator 95*. Os indicadores de impacto considerados foram: o efeito estufa, depleção da camada de ozono, potencial de acidificação (PA), potencial de eutrofização (PE), metais pesados, carcinogêneos, poluição atmosférica de inverno, poluição atmosférica de verão, pesticidas, consumo de água e energia e produção de resíduos sólidos. Os dados considerados para os processos de reciclagem mecânica, reciclagem criogénica e substituição de combustível foram baseados em dados de indústrias italianas, enquanto os dados considerados para a combustão com geração de energia elétrica foram obtidos através de modelos termodinâmicos. Os resultados demonstraram que o processo criogénico foi o processo que obteve o pior desempenho em todas as categorias de impacto face aos processos considerados, devido ao facto de consumir mais água em relação aos mesmos. Os indicadores de gases de efeito de estufa, consumo de água e consumo de energia foram analisadas com maior atenção. No indicador de gases de efeito de estufa, o processo criogénico possuiu o maior impacto ambiental de toda a categoria, enquanto que o processo de substituição de combustível possui aproximadamente zero de impacto e a combustão para geração de energia elétrica possui o melhor desempenho de todos os processos, principalmente devido aos efeitos evitados de geração de eletricidade por combustíveis convencionais. Nos indicadores ambientais de: depleção da camada de ozono, carcinogêneos, *smog* de inverno, *smog* de verão, consumo de água e consumo de energia foi observado que ambos os processos de tratamento possuíam a mesma ordem de impacto, isto é, de processo menos impactante para o processo mais impactante, o processo de geração de energia foi o menos impactante de todos os indicadores de impacto, seguindo-se a substituição de combustível, reciclagem mecânica e por fim, a reciclagem criogénica como a mais impactante. O estudo concluiu que ambos os processos de valorização energética permitiram um resultado interessante em termos de efeitos evitados, principalmente devido ao uso evitado de combustíveis convencionais. Entre essas duas alternativas, obteve-se um melhor resultado em termos do *Eco-indicator 95* final com a substituição de combustível para a indústria cimenteira. Esse resultado está vinculado aos fatores de ponderação assumidos pelo método *Eco-indicator 95*, no entanto, as duas alternativas de valorização de energia apresentaram melhores desempenhos ambientais do que as duas alternativas de valorização de material como material de preenchimento.

X. Li et al., (2010) também conduziram um estudo ACV na China, onde quatro processos de tratamento de pneus em fim de vida foram avaliados. Os processos de tratamento considerados nesse estudo foram: a reciclagem mecânica, a desvulcanização, a pirólise e a extração de óleo. A unidade funcional foi uma tonelada de pneus em fim-de-vida. O método de avaliação de impacto ambiental aplicado foi o *Eco-indicator 99* que modelou os impactos causados em sete categorias: potencial de acidificação, potencial de

ecotoxicidade, efeito carcinogénico, alterações climáticas, inaláveis inorgânicos, inaláveis orgânicos e combustíveis fósseis. Os dados considerados foram baseados em dados da indústria chinesa através da consideração de valores médios e dados da literatura. Foi observado que as fases de produção de energia e tratamento de pneus foram as principais fases contribuidoras de impacto nos vários processos (com exceção do processo de extração de óleo, em que a principal fase contribuidora de impacto foi o tratamento de pneus) em todas as categorias.

A normalização e ponderação também foram realizadas neste estudo, devido à falta de dados dedicados a referências chinesas. Os resultados demonstraram que a pirólise foi a alternativa que apresentou o melhor desempenho ambiental, enquanto a extração de óleo apresentou o pior desempenho ambiental. Foi observado em todos os processos que a principal categoria contribuidora de impacto positivo (pior desempenho ambiental) foi a categoria inaláveis (inorgânicos), enquanto que a categoria de combustíveis fósseis obteve um impacto negativo (o impacto negativo representa os impactos evitados) graças aos impactos indiretos gerados pela geração de energia elétrica e pela evitação de utilização de produtos de combustíveis fósseis. O pior desempenho ambiental observado no processo de extração de óleo, deveu-se principalmente à categoria carcinogénica, à categoria de ecotoxicidade e à categoria inaláveis inorgânicos, que estão associadas à sua fase de tratamento. O estudo concluiu que o processo de tratamento mais eco-eficiente foi a pirólise, seguindo-se a desvulcanização, a reciclagem mecânica e a extração de óleo de pneu.

No estudo realizado por W. Li et al., (2014) foi estudado o impacto ambiental associado à produção de granulado de borracha por meio de desvulcanização, através do método de impacto ambiental *Eco-indicator 99*. O processo de vulcanização considerou as fases de preparação de pó de borracha, a desvulcanização e refinação. As categorias de impacto utilizadas foram carcinogénicas, inaláveis orgânicos, inaláveis inorgânicos, alterações climáticas, radiação, camada de ozono, potencial de ecotoxicidade, potencial de acidificação/ eutrofização, uso de terreno, minerais e combustíveis fósseis. Adicionalmente, o cenário base (que consumia carvão e utilizava equipamentos convencionais) foi comparado com mais dois cenários, um cenário que consumia gás natural como fonte de energia e outro cenário que utilizava equipamentos de alta eficiência de dessulfurização e remoção de NO_x. O objetivo desta comparação consistiu na identificação de oportunidades de melhoria através da adoção de outras opções de equipamentos e combustíveis.

Foi observado nos resultados que a fase que possuiu o impacto ambiental mais elevado é a fase de desvulcanização. A carga ambiental associada a esta fase foi fruto da combustão de carvão devido às necessidades elevadas de calor desta fase, que resultou de emissões de SO₂, NO_x, CO₂ e poeiras. Comparando o cenário base com os outros dois cenários, foi observado que o cenário que considerou o gás natural obteve a maior redução de impacto especialmente nas categorias de inaláveis inorgânicos e saúde

humana, graças à utilização de um combustível menos impactante do que o carvão. Quanto ao cenário que considerou um equipamento mais eficiente do que o do cenário base, este apresentou menos impactos, mas não tão significativos.

Clauzade et al., (2010) conduziram um estudo ACV de avaliação da reutilização de granulado de pneu para nove alternativas. As alternativas foram distinguidas por métodos destrutivos (indústria cimenteira, fundições, indústria do aço e aquecimento urbano) e métodos não-destrutivos (bacias de retenção, bacias de infiltração, moldagem de objetos, relvados sintéticos e pisos equestres). A unidade funcional foi uma tonelada de pneus usados. As alternativas foram comparadas entre si e foram também comparadas com os respetivos métodos tradicionais. Os indicadores ambientais considerados neste estudo foram: consumo total de energia primária, consumo de recursos não-renováveis, consumo de água, potencial de eutrofização, emissões de gases de efeito de estufa de origem fóssil, emissões de gases ácidos, criação de ozono troposférico e produção de resíduos não perigosos. O estudo concluiu que a utilização de reciclado de pneu obteve maiores benefícios ambientais nas alternativas de produção de relvados sintéticos, moldação de objetos e recuperação energética na indústria cimenteira. Bacias de retenção e bacias de infiltração apresentaram os menores benefícios ambientais, mas ainda apresentaram vantagens face às suas soluções tradicionais.

Fiksel et al., (2011) também realizaram um estudo ACV de reutilização de pneus usados para diferentes aplicações com o objetivo de identificar e comparar os seus benefícios entre si e entre as suas alternativas tradicionais. As aplicações analisadas foram: combustível derivado de pneu (para indústria cimenteira, incineração para geração de energia elétrica e caldeiras), engenharia civil (preenchimento de estruturas de aterro e recolha de lixiviados), relvado artificial, produção de asfalto, moldagem de produtos e recauchutagem. O método de avaliação de impacto aplicado foi o TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*), a unidade funcional utilizada foi uma tonelada de pneus usados e as categorias de impacto ambiental analisadas foram: gases de efeito de estufa, resíduos sólidos, metais pesados, potencial de acidificação, potencial de ecotoxicidade, potencial de eutrofização, saúde humana carcinogénica e saúde humana não carcinogénica, *smog* fotoquímico e depleção de ozono. O estudo concluiu que a alternativa que apresentou melhores resultados ambientais foi a alternativa do relvado sintético, seguindo-se a valorização energética (como combustível na indústria cimenteira e na geração de energia elétrica).

Igualmente nos estudos ACV de Feraldi et al., (2013), Kløverpris & Schmidt (2009b) e Ortíz-Rodríguez et al., (2017), as análises consistiram em avaliar e comparar as opções de tratamento de pneus em fim de vida por processos de reciclagem mecânica de material e por processos de valorização energética (coincineração). Nestes estudos foram evidenciadas as mesmas conclusões, em que as opções de reciclagem de material

provaram ser ambientalmente mais benéficas do que as alternativas de valorização energética.

No estudo de Feraldi et al. foram analisadas as alternativas de produção de asfalto (por reciclagem mecânica) e coincineração (na indústria cimenteira), com a aplicação do método de avaliação de impacto TRACI e as categorias consideradas foram: aquecimento global, consumo de energia, minério de ferro, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, *smog* e efeitos respiratórios.

No estudo de Kloverpris e Schmidt foram analisadas as alternativas de reciclagem mecânica de material (para produção de asfalto e relvado sintético) para comparação com o processo de coincineração (indústria cimenteira), o método não foi especificado, mas as categorias consideradas foram aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial de toxicidade e potencial de criação de ozono fotoquímico.

No estudo de Ortíz-Rodríguez et al. as formas de tratamento que reutilizaram granulado de borracha de pneu foram a valorização energética (incineração na indústria cimenteira) e a valorização material por reciclagem mecânica (para produção de pisos e para produção de asfalto). A alternativa de utilização de granulado de borracha para produção de pisos apresentou o melhor desempenho face a todas as alternativas, seguindo-se respetivamente a incineração e a produção de asfalto.

Relativamente a estudos ACV que analisem o impacto e o benefício ambiental de combinações de granulado de borracha de pneus usados com polipropileno foram encontrados alguns estudos na literatura que analisaram o ciclo de vida dessa combinação, e que consistiram na produção de produtos. Simões et al. (2013) conduziram um estudo ACV não só com o objetivo de avaliar o benefício de substituição de alumínio por uma combinação polimérica constituída por polipropileno virgem e por granulado reciclado de pneu para uma estrutura de suporte de painéis solares. Nesse estudo também conduziram uma avaliação de impacto ambiental relativamente à variação de proporção de granulado de borracha de pneu no composto. A unidade funcional utilizada foi uma estrutura para painéis solares, o método de avaliação de impacto ambiental aplicado foi o *Eco-Indicator 99* que considerou: cancerígenos, inaláveis orgânicos, inaláveis inorgânicos, alterações climáticas, radiação, camada de ozono, potencial de acidificação/eutrofização, utilização do solo, minerais e combustíveis fósseis. As diferentes estruturas foram observadas da seguinte forma: uma comparação entre elas foi realizada considerando a fase de fim-de-vida e outra comparação foi realizada excluindo essa fase. Na exclusão dessa fase, os autores observaram nos resultados que a estrutura metálica apresentou impactos ambientais mais elevados em todas as categorias do que a estrutura alternativa. Por outro lado, quando se considerava como fim de vida a deposição em aterro de GBP, a estrutura de alumínio apresentava melhor desempenho ambiental do que a estrutura alternativa. Quando se considerava como fim de vida a valorização energética e a reciclagem, a

estrutura alternativa apresentava melhores desempenhos do que a estrutura metálica, especialmente o cenário de fim-de-vida de reciclagem. A fase de fim-de-vida demonstrou ser um fator relevante e influenciador das conclusões.

Em relação às proporções de PP mais benéficas ambientalmente para incorporação no produto, foi analisada uma variação de PP entre 100% a 20%, que correspondia a uma incorporação de GBP entre 0-80%. As categorias de impacto aplicadas nessa avaliação foram combustíveis fósseis, aquecimento global e minerais. Os resultados sugeriram que proporções inferiores a 71% de PP apresentavam melhor desempenho ambiental (considerando essas três categorias).

Yu et al. (2014) também realizaram um estudo ACV que analisou a mistura de granulado de borracha de pneu, PP e asfalto (*Plastic-Rubber-Asphalt*, PRA) para produção de pavimentos. O estudo teve como objetivo avaliar e comparar essa mistura com a mistura tradicional mais comum, *Styrene-Butadiene-Styrene* (SBS). A unidade funcional definida foi uma tonelada de mistura de asfalto. O método ambiental não foi declarado mas os itens considerados foram: consumo de energia (MJ), CO₂, CO, CH₄, NO_x, SO₂, VOC, PM_{2.5} e PM₁₀. O estudo concluiu que a mistura mais amigável ambientalmente foi a mistura PRA.

Quanto a estudos ACV referentes a coberturas das proteções metálicas de extensões rodoviárias apenas foi encontrado um estudo na literatura. Esse estudo (Moral et al., 2004) teve como objetivo avaliar se o impacto ambiental associado à adição de uma cobertura para as infraestruturas horizontais metálicas, constituída por uma mistura de granulado de borracha de pneus usados com poliolefinas por meios de injeção. A unidade funcional utilizada foi um metro do sistema de proteção. O método de avaliação de impacto ambiental aplicado foi o *Eco-Indicator 99* e estudou apenas a categoria de dano ambiental para a Saúde Humana, que se desdobrou em subcategorias, nomeadamente: carcinogêneos, inaláveis inorgânicos, inaláveis orgânicos, potencial de aquecimento global, radiação, camada de ozono, potencial de ecotoxicidade, potencial de acidificação/eutrofização, utilização do solo, minerais, combustíveis fósseis. Os autores concluíram que os principais danos ambientais associados a este produto para a saúde humana estavam associados ao aquecimento global, inaláveis inorgânicos e cancerígenos.

Atualmente, foi possível encontrar na literatura vários estudos ACV que analisaram diferentes aplicações de valorização de pneus em fim-de-vida como ilustrado na Tabela 2. Os artigos mencionados foram os estudos considerados mais representativos e relevantes para o presente caso de estudo. Foi observado na literatura que não existe consenso quanto a qual tratamento de valorização deste material é o mais sustentável ambientalmente. Porém, de uma forma geral, os estudos demonstraram que o tratamento que oferecia melhor desempenho ambiental era a reciclagem mecânica para relvado sintético. A reutilização de granulado de borracha de pneu revelou ser uma solução promissora para produção de produtos mais sustentáveis ambientalmente,

dado que foi observado mais do que uma vez em vários estudos que a sua incorporação originou reduções de impactos ambientais em relação às suas alternativas tradicionais.

Apesar de existirem vários artigos sobre ACV que analisam várias alternativas de valorização de granulado de borracha de pneu para incorporação e produção de novos produtos, no domínio de proteções dos prumos verticais de sustentação das infraestruturas da extensão rodoviária, a sua existência é escassa, existindo apenas um estudo nesse campo. Existem ainda lacunas e questões na literatura relativamente aos impactos e danos ambientais proporcionados pelas combinações de GBP e PP para constituírem produtos de cobertura das proteções metálicas rodoviárias. Neste contexto, o presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento ambiental desta alternativa de valorização de granulado de borracha de pneus usados ao longo do ciclo de vida e averiguar qual a combinação ecologicamente mais favorável.

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

- 3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO
- 3.2 INVENTÁRIO
- 3.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL

3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE PERFIL DE PROTEÇÃO RODOVIÁRIA

A avaliação de ciclo de vida é uma metodologia de avaliação de desempenho ambiental utilizada internacionalmente que procura estimar os impactos ambientais potenciais ao longo de diferentes fases do ciclo de vida de um produto: desde a extração das matérias-primas até à deposição final (*cradle-to-grave*), isto é, inclui a extração das matérias-primas, transporte, produção, distribuição para o consumidor final, consumo/utilização e termina com a tratamento final, podendo envolver reciclagem ou deposição em aterro. Esta metodologia considera os fluxos de entrada e de saída de um sistema (produto ou serviço) ao longo de diferentes processos unitários, contabilizando fluxos de matérias-primas, consumos de energia, emissões, e fluxos de resíduos associados ao longo do seu período de vida.

A ACV provou ser uma metodologia de análise adequada e benéfica em diversas questões ambientais, nomeadamente na (IPQ, 2006):

- Identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental de produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- Informações aos decisores de organizações governamentais e não governamentais, como por exemplo no planeamento estratégico, design ou redesign de produtos ou processos, definição de prioridades);
- Seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental;
- Estratégias comerciais (marketing), como por exemplo na implementação de esquemas de rótulos ecológicos, elaboração de alegações ambientais ou produção de declarações ambientais de produtos.

Esta metodologia tem a sua estrutura definida pelas normas ISO 14040 e 14044, que são internacionalmente aceites. Como se pode ver na A Figura 4, a metodologia de ACV engloba diferentes 4 fases de análise que estão interrelacionadas entre si (IPQ, 2006, 2010):

- Fase de definição do objetivo e âmbito - o objeto (produto ou processo) de estudo é definido. Esta fase incluiu o propósito do estudo, as suas aplicações e o seu público-alvo. A unidade funcional é definida e as fronteiras do sistema são caracterizadas;
- Fase de inventário - os dados de entrada e saída dos processos unitários relevantes são recolhidos de acordo com o objetivo e âmbito definidos;

- Fase de avaliação de impacto - os impactos ambientais são calculados de acordo com os dados recolhidos na fase de inventário.
- Fase de interpretação - os resultados obtidos na fase de avaliação de impacto são observados e interpretados.

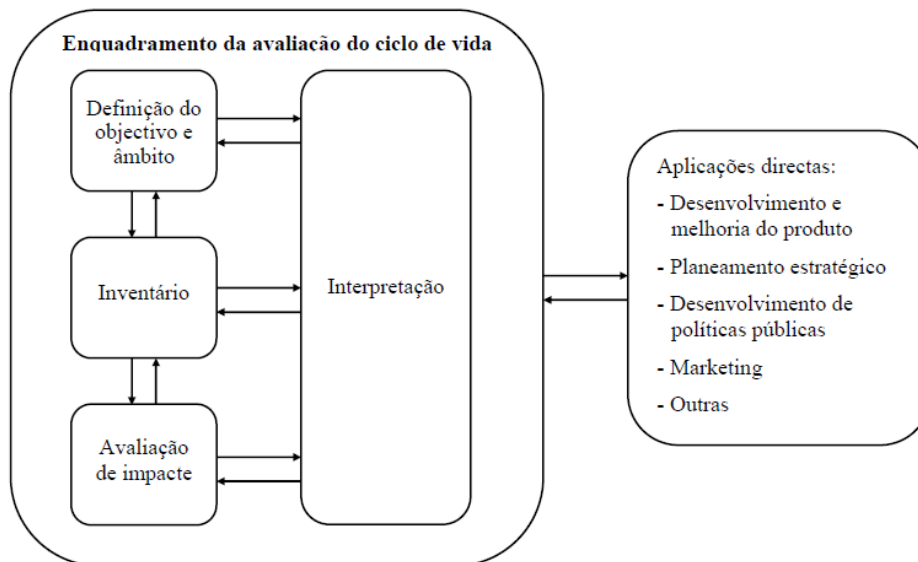


Figura 4 - Fases de um estudo de ACV, de acordo com a norma ISO 14040:2006 (IPQ, 2006)

3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO

Neste trabalho, o caso de estudo é um produto – perfil de proteção rodoviária – em desenvolvimento no âmbito do projeto *Safety4Road* com propósito de servir como cobertura de prumos verticais de sustentação dos rails rodoviários.

O perfil em causa (esquematizado na Figura 5), tem 395 mm de altura e um volume de 0,01889 m³. A estrutura alveolar do perfil e a respetiva fieira que serve de base à extrusão, foram otimizadas por parceiros do projeto *Safety4Road* e são distintas do esquema apresentado na Figura 5 para respeitar o termo de confidencialidade subjacente ao projeto. Assim, a geometria do perfil foi otimizada tendo em conta os materiais a serem utilizados, e as seguintes funções:

- Amortecer o impacto de colisões contra estas infraestruturas, de forma a mitigar e minimizar os danos associados e proteger os motociclistas em ocasiões de acidente e despiste;
- Conferir maior elasticidade às estruturas metálicas, com intuito de diminuir as suas alterações dimensionais no caso de colisões.

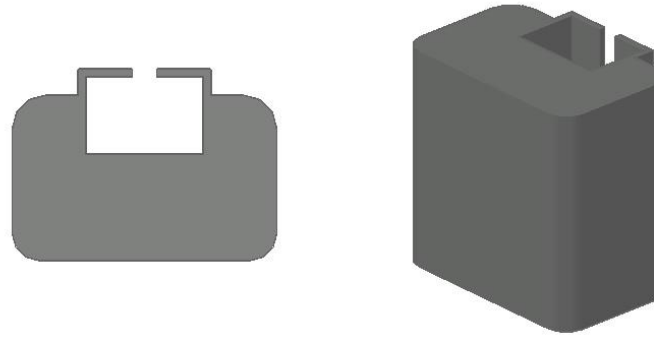


Figura 5 – Estrutura do produto do caso de estudo

Neste contexto, a otimização deste produto baseou-se em materiais que conferissem estas propriedades e correspondessem a essas funções (misturas de um elastómero com um termoplástico). Com base em princípios de economia circular e para produzir um produto ambientalmente mais sustentável, o perfil foi otimizado geometricamente para ser produzido por extrusão de misturas que incorporem um material reciclado – o granulado de borracha de pneu em fim de vida (GBP) – e polipropileno (PP).

Assim, o objetivo inicial deste estudo de ACV é o de caracterizar os potenciais impactos ambientais do perfil produzido com duas misturas alternativas selecionadas pelos parceiros que têm proporções mássicas diferentes destes dois materiais: mistura A com 55% de GBP e 45% PP e mistura B com 70% RBP e 30% PP. Neste cenário base, espera-se que a ACV permita identificar qual destas misturas oferece mais benefícios ambientais e assim informar e apoiar a decisão dos parceiros do projeto.

Paralelamente ao cenário base (cenário 1) foram considerados dois cenários teóricos alternativos para comparação com o cenário base. A comparação consistiu na análise dos benefícios e impactos ambientais proporcionados face à incorporação de materiais reciclados ou convencionais. Os cenários teóricos alternativos considerados foram:

- Cenário de material virgem (cenário 2). A consideração deste cenário teve o objetivo de fornecer uma melhor perceção e compreensão dos impactos ambientais que o cenário base mitigou ou proporcionou por incorporar GBP em vez de borracha sintética (BS); Este cenário considerou duas misturas constituídas por BS e PP.
- Cenário de material reciclado (cenário 3). A consideração deste cenário teve o objetivo de fornecer uma melhor perceção e compreensão dos impactos ambientais que o cenário base pode vir a evitar ou gerar se fosse incorporado Polipropileno reciclado (PPR) em vez de PP. Este cenário considerou duas misturas constituídas por GBP e PPR.

Na Tabela 3 resumem-se as composições das misturas consideradas nos diferentes cenários.

Tabela 3 - Proporções das misturas alternativas consideradas para o produto em cada cenário

	Mistura	GBP	PP	BS	PPR
Cenário base	A	55%	45%		
	B	70%	30%		
Cenário de material virgem	C		45%	55%	
	D		30%	70%	
Cenário de material reciclado	E	55%			45%
	F	70%			30%

Nota: As percentagens estão dimensionadas em massa; Legenda GBP: Granulado de Borracha de Pneu; PP: Polipropileno; BS: Borracha Sintética; PPR: Polipropileno Reciclado

3.1.1 UNIDADE FUNCIONAL

A unidade-funcional é a unidade utilizada como referência para permitir uma comparação justa de resultados de diferentes objetos de estudo.

A unidade funcional deste estudo de ACV é um perfil de proteção rodoviária com 395 mm de altura e um volume de 0,01889 m³, obtido através de extrusão de diferentes misturas alternativas.

3.1.2 FRONTEIRA DO SISTEMA

A fronteira do sistema define os processos unitários considerados na ACV. As fronteiras do sistema consideradas neste estudo encontram-se ilustradas na Figura 6.

O presente estudo de ACV realizou uma análise *cradle-to-gate* (berço ao portão) e teve como base as normas ISO 14040 e ISO 14044.

A fronteira do sistema considerou impactos desde a extração das matérias-primas, até a obtenção do produto final à saída da fábrica, incluindo os impactos da produção dos diferentes materiais, o seu transporte para a fábrica e a conceção do produto final (perfil extrudido).

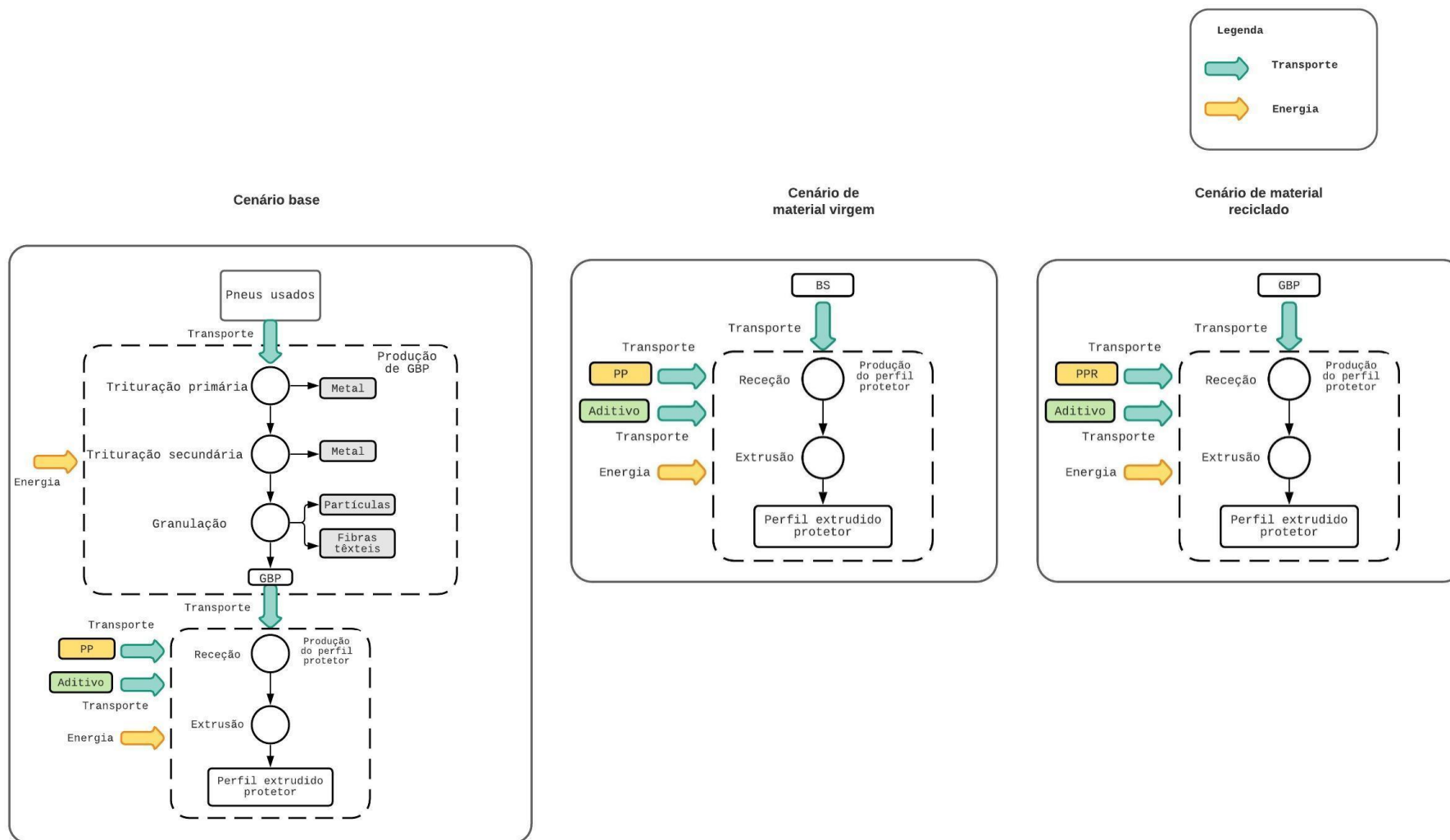


Figura 6 - Fronteira dos diferentes cenários

Para cada processo unitário foram considerados fluxos de entrada e de saída. Os fluxos de entrada considerados foram os materiais e a energia e os fluxos de saída foram os resíduos, produtos e co-produtos gerados.

O ciclo de vida considerado para GBP iniciou-se no ponto de recolha de pneus usados, com o transporte de pneus usados para a unidade de produção de GBP, a sua produção e o seu transporte para a unidade de produção do perfil protetor. O tipo de reciclagem de pneu adotada para este caso de estudo, foi a reciclagem por meios mecânicos.

O ciclo de vida considerado para os restantes materiais (PP, aditivo, PPR, BS) inclui impactos desde a extração das matérias primas, a produção dos materiais e o seu transporte para a unidade fabril de produção do perfil.

Na produção do perfil, o processo de extrusão que consiste na transformação dos materiais no produto desejado (perfil extrudido protetor).

3.1.2.1 PROCESSOS INCLUÍDOS

Na análise de ciclo de vida do perfil protetor, foram considerados os seguintes processos:

- Transporte: O processo de transporte incluiu o transporte de material desde o fabricante primário (fabricante de GBP, PP e do aditivo) até ao fabricante secundário (fabricante do perfil protetor). No caso do GBP, a fase de transporte considerou desde o ponto de recolha de pneus usados até ao fabricante primário e depois até ao fabricante secundário;
- Processo de produção de materiais: O processo de produção incluiu a transformação de matéria-prima em produtos finais e o seu empacotamento, incluindo o consumo de energia dos equipamentos;
- Processo de produção do perfil: Nesta fase foram incluídos os impactos associados à extrusão incluindo os consumos de energia, material e o processo de empacotamento do produto final.

3.1.2.2 PROCESSOS EXCLUÍDOS

Neste estudo não foram contempladas algumas fases de ciclo de vida deste produto, nomeadamente:

- A fase de transporte e instalação do perfil de proteção rodoviário.
- A fase de vida útil do perfil, pois assume-se que não tem impactos associados.
- A fase de fim de vida do perfil: sua remoção e substituição quando danificado após embate e o seu tratamento de fim de vida (reciclagem ou outro);
- A fase de tratamento de resíduos ou co-produtos da produção de GBP (metais, fibras têxteis e partículas)

A etapa de recolha de pneus em fim de vida não foi considerada, assumindo-se que os pneus eram entregues no reciclador pelo detentor.

3.2 INVENTÁRIO

Nesta fase do estudo de ACV, foram recolhidos dados de inventário de ciclo de vida para documentar as diferentes alternativas em estudo para a unidade funcional em causa. Os dados utilizados neste estudo provieram de dados primários e de dados secundários. As fontes de dados primários foram as entidades parceiras envolvidas no estudo e as fontes de dados secundários foram as fontes bibliográficas e da base de dados do inventário de ciclo de vida da *ecoinvent 3.6*, disponível no software do *SimaPro™* (Goedkoop, 2013; Moreno Ruiz et al., 2019). As fontes bibliográficas consultadas neste estudo sobre as entradas e saídas dos processos foram as listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Origem dos dados utilizados no caso de estudo

Entradas e saídas	Fonte de dados
Produção de GBP	
Pneus usados	
Eletricidade	Quantidades de Corti & Lombardi (2004) e impactos ambientais de <i>ecoinvent 3.6</i> , incluindo <i>mix</i> energético Português
Água	
Metal	
Resíduos	
Produção de PP	<i>ecoinvent 3.6</i> .
Eletricidade	
Químicos	
Outras entradas e saídas	
Produção de aditivo	<i>ecoinvent 3.6</i> .
Produção de BS	<i>ecoinvent 3.6</i> .
Produção de PPR	<i>Franklin Associates (2018)</i>
Eletricidade	Quantidade de <i>Franklin Associates (2018)</i> e impactos ambientais do <i>mix</i> energético Português (<i>ecoinvent 3.6</i>)
Químicos	Quantidade de <i>Franklin Associates (2018)</i> e impactos ambientais de <i>ecoinvent 3.6</i>
Outras entradas e saídas	Quantidade de <i>Franklin Associates (2018)</i> e impactos ambientais de <i>ecoinvent 3.6</i>
Extrusão do perfil	<i>ecoinvent 3.6</i> .

Para documentar a produção do GBP, foram escolhidos os dados bibliográficos do estudo realizado por Corti e Lombardi (2004), uma vez que, era um estudo realizada na Itália, um país pertencente à comunidade europeia, tal como Portugal, e também devido

às proximidades culturais e de realidade tecnológica. As informações utilizadas como referência foram os dados relativamente a entrada de matéria-prima (pneu) e energia, quanto às saídas foram os dados de resíduos sólidos, tais como GBP, fibras têxteis e metais.

As informações recolhidas do relatório de *Franklin Associates* (FA) foram referentes ao processamento de PPR, tais como entradas de energia e materiais (químicos e água). Foram usados os dados deste relatório, uma vez que, foi o único documento encontrado na literatura com estes dados, e também porque se considerou que a realidade tecnológica será semelhante à de Portugal.

Estes dados foram cruzados com dados da *ecoinvent 3.6*, no software SimaPro.

3.2.1 CONSIDERAÇÕES E PRESSUPOSTOS

Durante a realização deste estudo existiram algumas dificuldades e limitações na obtenção de dados. Algumas dificuldades encontradas consistiam na recolha de dados e informações inerentes às fases de produção de materiais e à ferramenta informática de base de dados relativamente a processos e materiais utilizados. Na ocorrência destas limitações, foram utilizados dados de literatura, dados de processos e materiais semelhantes encontrados na base de dados. Foi dada preferência à utilização de dados portugueses neste estudo, quando estes não estavam disponíveis, utilizaram-se dados europeus. Na Tabela 5 encontram-se descritos o conjunto de dados da *ecoinvent 3.6* utilizados neste estudo de ACV.

Tabela 5 - Lista de dados da *Ecoinvent 3.6* utilizados no estudo de ACV

Material/Processo	Dados da <i>Ecoinvent 3.6</i>
Aditivo	<i>Maleic anhydride production</i> – PT
BS	<i>Synthetic rubber production</i> – PT
Empacotar	<i>Packing, lime product processing</i> – PT
Energia elétrica	<i>Electricity, medium voltage, market for</i> – PT
Transporte	<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro4, market for</i> – RER
PP	<i>Polypropylene, granulate production</i> – PT
PPR	<i>Polyethylene granulate production, high density, granulate, recycling</i> – PT
	<i>Waste Polyethylene recycling, high density, treatment of waste polyethylene, for recycling</i> – PT
Extrusão	<i>Extrusion, plastic pipes</i> – PT

Legenda: PT: Processos cujo consumo elétrico foi adaptado ao *mix* elétrico Português presente no *Ecoinvent 3.6*

O aditivo utilizado não foi especificado pelos parceiros, porém foi revelado que era um copolímero da família de *anhydride* e que era equivalente ao aditivo *maleic anhydride*.

A borracha sintética virgem considerada foi a *Ethylene Propylene Diene Monomer* (EPDM) constituída por materiais semelhantes à borracha do pneu (*carbon black* e borracha natural) e produzida, igualmente, por processos de vulcanização.

O processo de empacotar (embalagem) de materiais encontrada na base de dados com mais semelhanças com os materiais utilizados no caso de estudo foi o de pó de cal, uma vez que, pó de cal apresenta dimensões e densidades aproximadas aos dos materiais de granulado utilizados neste estudo.

Não existem na base de dados, informações inerentes ao processo de reciclagem do polipropileno, neste caso, encontramos duas alternativas: a) Utilizar dados de polietileno (*polyethylene*) como referência (*Proxy*). b) Modelar o processo de reciclagem com base em dados de inventários fornecidos no relatório de Franklin Associates (FA) adaptando sempre que possível o *mix* elétrico ao contexto português; *Franklin Associates* caracteriza o processo de reciclagem de PP nos USA com base em dados de recolha de resíduos e reciclagem locais.

Assim, selecionou-se esta última opção (b), por se considerar que ela seria mais aproximada à realidade por se tratar da reciclagem do mesmo termoplástico e por ser possível de ser adaptada à realidade energética nacional usando a base de dados Ecoinvent 3.6.

Na base de dados, o processo de extrusão adotado como equivalente para o caso de estudo foi o processamento de extrusão de tubos de plástico, uma vez que este processo é representativo da extrusão de matrizes plásticas e de borracha como o caso de estudo.

A percentagem de aditivo a incorporar em cada mistura não foi revelada pelos parceiros, a determinação dessa quantidade de material nas misturas foi baseada de acordo com o relatório: “Material compósito de granulado de borracha de pneus usados reciclado numa matriz polimérica” (Wo et al., 2014).

3.2.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO

A fase de análise do inventário envolve a recolha de dados e elaboração de procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes do sistema em estudo para a unidade funcional. Nesta secção encontram-se os dados de inventário considerados durante o ciclo de vida de cada mistura. As quantidades consideradas nas entradas e nas saídas das misturas foram inventariadas e estão apresentadas por unidade funcional.

Na Tabela 6 apresentam-se as distâncias consideradas para cada material. A distância considerada para o transporte de pneus usados corresponde à distância entre o ponto de recolha de pneus usados e a unidade de produção de GBP. As distâncias consideradas para os materiais: GBP, PP, aditivo, BS e PPR, correspondem às distâncias entre os fornecedores de materiais e a unidade de produção do perfil extrudido.

Tabela 6 - Distâncias de transportação de materiais

Material	Pneus usados	GBP	PP	Aditivo	BS	PPR
Distância (km)	43,733	165	2613,33	1914,33	199	16,3

Na Tabela 7 encontram-se listadas as entradas e saídas consideradas para o processo de produção de GBP.

Tabela 7 - Dados de inventário para a produção de GBP

Processo	Entrada	Saída	Quantidade
Trituração primária			
	Pneus usados		1000 kg
	Eletricidade		47,2222 kWh
	Água		150 kg
		Metais	34 kg
		Pneus triturados I	966 kg
Trituração secundária			
	Pneus triturados		966 kg
	Eletricidade		153,755 kg
		Fragmentos de pneus	724,5 kg
		Metais	241,5 kg
Granulação			
	Fragmentos de pneus		724,5 kg
	Eletricidade		103,24125 kWh
		GBP	681,03 kg
		Fibras têxteis	43,47 kg

Na Tabela 8 encontram-se descritos os dados de inventario considerados para as diferentes misturas, apresentados por unidade funcional.

Tabela 8 - Dados de inventário do processo de extrusão

	Cenário base		Cenário de material virgem		Cenário de material reciclado	
	A	B	C	D	E	F
Entradas						
GBP (kg)	10,0086	13,2427			10,0086	13,2427
PP (kg)	8,1889	5,6754	8,1889	5,6754		
Aditivo (kg)	0,9578	0,9957	0,9578	0,9957	0,9578	0,9957
BS (kg)			10,0086	13,2427		

	Cenário base		Cenário de material virgem		Cenário de material reciclado	
	A	B	C	D	E	F
PPR (kg)					8,1889	5,6754
Eletricidade (kWh/kg)	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Saídas						
Perfil extrudido (kg)	19,0789	19,8345	19,0789	19,8345	19,0789	19,8345
Partículas (kg)	0,0766	0,07966	0,0766	0,07966	0,0766	0,07966

3.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL

A avaliação de impacto ambiental (AIA) é uma fase fundamental na quantificação de impactos ambientais no ciclo de vida do produto. A avaliação de impacto analisa todas as entradas e saídas de forma que seja possível identificar os seus aspetos de maior relevância. A análise utiliza indicadores ou categorias ambientais de forma a traduzir os impactos do sistema no ambiente.

Neste estudo foi utilizado o método ReCiPe para quantificação destes impactos ambientais (RIVM, 2017). O método ReCiPe é um método que traduz a quantificação de impactos ambientais em categorias de impacto através de duas formas de caracterização de fatores: *midpoint* e *endpoint*. A caracterização por *midpoint* constitui as seguintes categorias:

- Aquecimento Global (AG)

O aquecimento global está associado às alterações de temperatura global, causadas pelas emissões de gases de efeito de estufa (GEE) fruto das atividades humanas. O impacto associado a este efeito são as perturbações de temperaturas globais e dos fenómenos climáticos. Esta categoria contabiliza as emissões de GEE (metano (CH₄), dióxido de azoto (NO₂), etc.) durante cerca de 100 anos.

- Depleção de Ozono Estratosférico (DOE)

Este indicador está associado à diminuição da camada de ozono por emissões de substâncias (CFCs, HCFC, halon), fruto das atividades antropogénicas. O impacto associado a este efeito é o aumento da penetração de radiação UV-B e do número de casos de doenças de pele.

- Radiação Ionizante (RI)

Este indicador está relacionado com as emissões de radionuclídeos. A RI pode estar ligada à utilização de energia nuclear no *mix* energético. Esta categoria considera a radiação α , β , raios- γ e neutrões. Os impactos estão associados aos efeitos da radiação, nomeadamente o declínio da saúde, cancro e outras doenças.

- Formação de Partículas (FP)

Este indicador está associado à poluição gerada pela presença de partículas de origem de várias substâncias como: ácidos, químicos orgânicos, metais e partículas de poeira ou do solo. A poluição associada à presença de pequenas partículas prejudica a saúde especialmente a respiratória.

- Formação de Ozono (FO)

Este indicador está associado à presença de ozono (O_3) ao nível do solo. O ozono é uma substância tóxica para o ser humano em concentrações elevadas. O ozono fotoquímico ou “ozono a nível do solo” é formado através da reação de compostos orgânicos voláteis e óxidos de azoto na presença de calor e luz solar.

- Acidificação Terrestre (AT)

Os gases como o dióxido de enxofre (SO_2) quando reagem com água na atmosfera formam as chuvas ácidas. A precipitação deste tipo de chuvas provoca danos para o ecossistema, nomeadamente acidez nos sistemas de água e dos solos. Os gases que causam chuvas ácidas são o amoníaco (NH_3), óxidos de azoto (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x).

- Eutrofização de Água Doce (EAD)

A eutrofização na água doce ocorre quando existe o excesso de descarga de nutrientes para o solo ou para água doce. A eutrofização na água doce provoca a proliferação de uns organismos e a perda de outros. Esta categoria considera a transferência de fósforo (P) do solo para a água doce e o seu tempo de residência.

- Eutrofização Marinha (EM)

A eutrofização marinha ocorre devido ao escoamento e lixiviação de nutrientes das descargas das indústrias no solo, nos rios e no mar. Os impactos associados à eutrofização marinha são a depleção de oxigénio bentónico, que conduz ao aparecimento de águas hipóxicas e, se em excesso, anóxicas e “zonas mortas” que é uma das causas mais graves associada a esta perturbação no ecossistema marinho.

- Toxicidade Humana (TH)

Esta categoria expressa o dano, em unidades químicas libertadas para o ambiente, baseado num composto tóxico, e a sua potencial dose. Estes compostos podem ser produtos como o arsénio, dicromato de sódio e fluoreto de sódio. Esta categoria é dividida em duas subcategorias: Toxicidade humana cancerígena e toxicidade humana não-cancerígena. Os impactos associados a esta categoria são cancro, doenças respiratórias e outras doenças não-cancerígenas.

- Ecotoxicidade (ET)

A toxicidade ambiental é medida em três subcategorias: ecotoxicidade de água doce, marinha e terrestre. Esta categoria contabiliza os efeitos tóxicos de químicos no meio

de água doce, marinho e terrestre. A perda de biodiversidade e/ou extinção de espécies são os impactos associados a esta categoria.

- Ocupação do Solo (OS)

Esta categoria foca-se nos impactos associados à ocupação de terreno para atividades humanas (agricultura, extração de recursos, etc.). Os impactos que esta categoria inclui são as perdas de espécies (dado que se desqualifica a área para um habitat adequado para as espécies), de terreno, quantidade de matéria seca orgânica, etc.

- Consumo de Água (CA)

Nesta categoria, o consumo de água corresponde à água utilizada que é evaporada, incorporada em produtos, transferida para outras bacias hidrográficas ou descartada no domínio hídrico. O consumo de água é a água que foi consumida e que por isso não está mais disponível na sua origem para humanos ou para os ecossistemas.

- Depleção de Recursos Minerais (DRM) e Depleção de Recursos Fósseis (DRF)

Nestas duas categorias, os impactos estão associados ao consumo de recursos não-biológicos, no caso de DRM é o consumo de minerais e no caso de DRF é o consumo de combustíveis fósseis. Neste caso, os impactos estão associados ao consumo de recursos naturais e dos ecossistemas.

Na Tabela 9 encontram-se listadas resumidamente as categorias de impacto utilizadas no método ReCiPe, com as suas respetivas descrições e unidades.

Tabela 9 – Categorias de impacto *midpoint*

Categoria	Descrição da categoria	Unidade em <i>midpoint</i>
<i>Aquecimento Global</i>	Potencial de aquecimento global, quantificado através das emissões de dióxido de carbono (CO ₂) para o ar	kg de dióxido de carbono (CO ₂) equivalentes
<i>Depleção de ozono estratosférico</i>	Potencial da depleção da camada de ozono, quantificado pelas emissões de CFC-11	kg CFC-11 (clorofluorcarboneto) equivalentes
<i>Radiação Ionizante</i>	Potencial de problemas de saúde humana devido à libertação de material radioativo para o meio ambiente	kBq Co-60 (Becquerel de Cobalto)
<i>Formação de partículas</i>	Potencial de problemas de saúde humana devido à inalação de partículas em suspensão	kg PM2.5 (Particulate Matter/matéria particulada)
<i>Formação de ozono</i>	Potencial de formação de ozono através de reações fotoquímicas	kg NO _x

Categoria	Descrição da categoria	Unidade em <i>midpoint</i>
<i>Acidificação Terrestre</i>	Potencial de acidificação do solo terrestre devido às emissões de SO ₂ para o ar	kg SO ₂
<i>Eutrofização de água doce</i>	Potencial de eutrofização devido a emissões de fósforo para a água doce	kg P (Fósforo) na água doce
<i>Eutrofização marinha</i>	Potencial de eutrofização devido a emissões de azoto para a água do mar	kg N (Azoto) na água marinha
<i>Toxicidade humana</i>	Potencial de intoxicação humana através da inalação de substâncias tóxicas	kg 1,4 – DCB* no ar urbano *DCB: Diclorobenzeno
<i>Ecotoxicity</i>	Potencial de intoxicação do solo e da água devido a emissões de substâncias tóxicas	kg 1,4 – DCB
<i>Ocupação dos solos</i>	Potencial de danos nos ecossistemas devido à ocupação e transformação do solo	m ² x yr anual crop land (metros quadrados x anuais de solo agrícola)
<i>Consumo de água</i>	Quantificação de água utilizada que não é aproveitada	m ³ (metros cúbicos)
<i>Depleção de recursos minerais</i>	Quantificação de minerais utilizados	kg Cu (cobre)
<i>Depleção de recursos fósseis</i>	Quantificação de combustíveis fósseis (conjunto de recursos que contém hidrocarbonetos) que são utilizados	kg oil (petróleo)

A caracterização por *endpoint* baseia-se nas seguintes categorias:

- Saúde Humana (SH), que se traduz nas consequências de dano ambientais para a saúde humana, e representa os anos perdidos ou que uma pessoa ficou incapacitada devido a uma doença ou acidente, *Disability-Adjusted Loss of life Years* (DALY);
- Meio-ambiente (MA), que se traduz nos danos de qualidade do ecossistema. É expresso em tempo integrado de perda de espécies por ano, *time-integrated species loss* (species x yr);
- Depleção de recursos (DR), que se traduz nos custos extras necessários para a futura extração de recursos minerais e fósseis. É expresso em dólares (*Dollar*).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- 4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DE CADA MISTURA
- 4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados do estudo de ACV obtidos através do software *SimaPro* (Pré, 2014; RIVM, 2017) relativamente à caracterização para as categorias de impacto ambiental *midpoint* e *endpoint* do método *ReCiPe*. São assim apresentados e analisados os potenciais impactos ambientais afetos ao perfil em estudo para as diferentes misturas alternativas.

Na secção 4.1, foi observado individualmente o desempenho ambiental de cada mistura do ponto de vista *midpoint* e *endpoint*. Os principais materiais mais impactantes de cada mistura foram identificados e analisados.

Na secção 4.2, apresenta-se a análise e comparação dos desempenhos ambientais das misturas em cada cenário. Os resultados foram apresentados em *midpoint* e *endpoint*. Numa primeira fase foi realizada a comparação entre misturas do mesmo cenário, em 4.2.1, e posteriormente foi realizada a comparação entre os diferentes cenários, em 4.2.2.

4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DE CADA MISTURA

Nesta secção os resultados para as misturas são apresentados e analisados individualmente. Os principais agentes contribuidores de impacto ou dano ambiental são identificados, nomeadamente materiais e fases responsáveis por esses resultados.

Numa fase inicial foi realizada a apresentação dos resultados da caracterização *midpoint* em 4.1.1 e posteriormente foi realizada a apresentação dos resultados da caracterização *endpoint* em 4.1.2.

4.1.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS EM *MIDPOINT*

Nesta secção encontram-se os resultados de impacto ambiental obtidos para a caracterização *midpoint*, relativamente a cada mistura. A caracterização contemplou todo o ciclo de vida das misturas.

A análise das misturas consistiu na observação do desempenho ambiental ao longo do seu ciclo de vida. Os materiais que representaram mais impacto ambiental em cada mistura foram observados e identificados.

Na Tabela 10 apresentam-se os resultados obtidos para cada mistura e para cada categoria de impacto, tendo em consideração o seu ciclo de vida integral.

Tabela 10 - Resultados obtidos pelo ReCiPe

Mistura						
	A	B	C	D	E	F
Categoria						
Aquecimento global (kg CO₂ eq)	30,4614	25,4890	49,6136	50,8299	14,7839	14,6234
Depleção do ozono estratosférico (kg CFC11 eq)	4,2988E-06	4,3587E-06	1,7524E-05	2,1857E-05	5,1359E-06	4,9389E-06
Radiação ionizante (kBq Co-60 eq)	0,6761	0,7256	1,4275	1,7198	0,6305	0,8577
Formação de ozono (kg NO_x eq)	0,1425	0,1215	0,2465	0,2590	0,0699	0,0711
Formação de partículas (kg PM2.5 eq)	0,0350	0,0319	0,0654	0,0721	0,0237	0,0240
Acidificação terrestre (kg SO₂ eq)	0,0981	0,0888	0,1752	0,1908	0,0642	0,0653
Eutrofização de água doce (kg P eq)	0,0044	0,0045	0,0083	0,0096	0,00466	0,00467
Eutrofização marinha (kg N eq)	3,61E-04	3,54E-04	6,52E-04	7,40E-04	6,79E-04	5,75E-04
Ecotoxicidade (kg 1,4-DCB)	55,5193	46,3832	102,0415	107,9381	27,7415	27,1312
Toxicidade humana (kg 1,4-DCB)	7,4241	7,0531	23,7508	28,6555	18,4738	14,7113
Ocupação do solo (m² a crop eq)	1,6082	1,6714	1,8017	1,9275	1,5668	1,6427
Depleção de recursos minerais (kg Cu eq)	0,0210	0,0192	0,1222	0,1531	0,0215	0,0195
Depleção de recursos fósseis (kg oil eq)	16,6907	12,8581	31,7028	32,7211	4,0313	4,0842
Consumo de água (m³)	0,3961	0,3719	0,6965	0,7695	0,2873	0,2965

Na

Figura 7 apresentam-se os resultados das categorias de impacto ambientais em *midpoint* para as diferentes misturas alternativas. De forma a ser possível comparar diferentes categorias de impacto na mesma figura, os resultados para as diferentes misturas são apresentados em função dos resultados obtidos para a mistura A (100%).

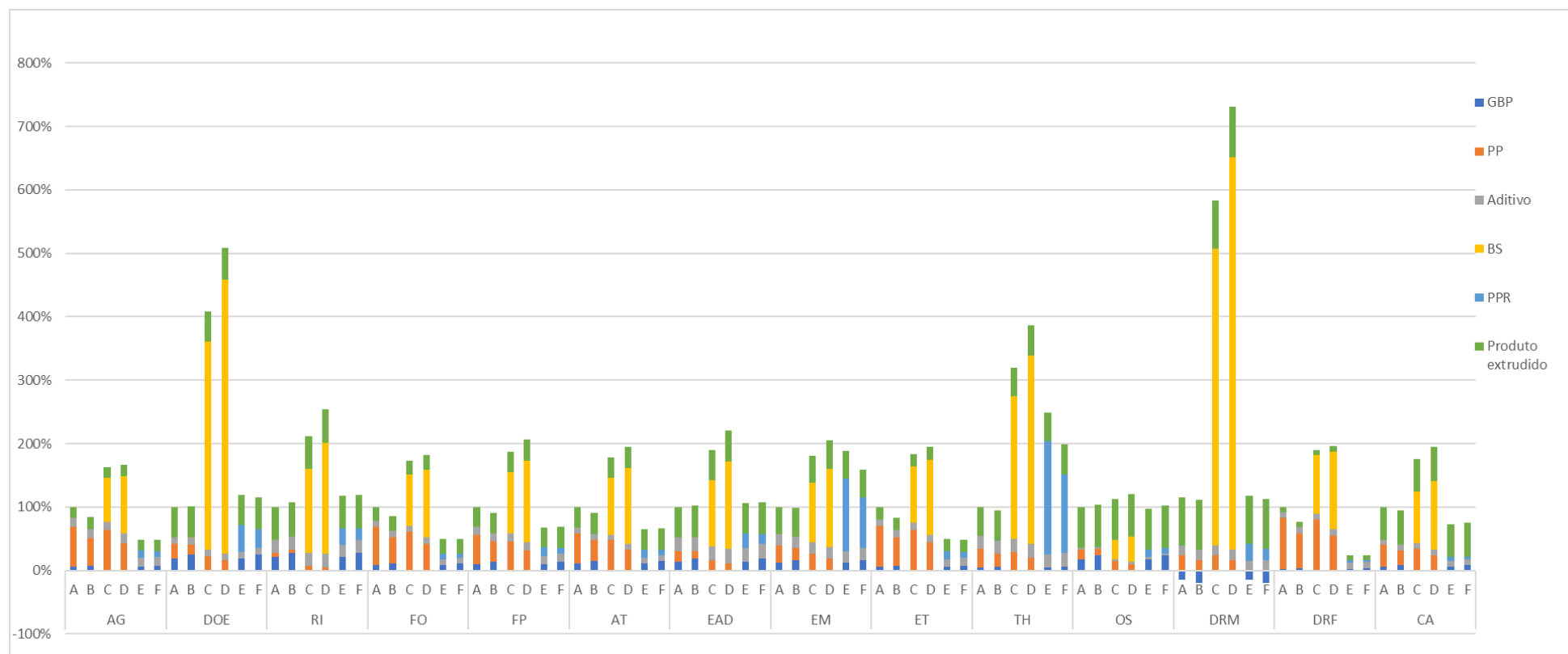


Figura 7 - Resultados das categorias ambientais em midpoint

Os impactos ambientais destas seis misturas foram observados e examinados em 14 categorias de impacto ambiental.

No cenário 1, em que as misturas foram constituídas por GBP e PP, foi observado que o PP foi o principal contribuidor de impacto ambiental nas categorias de: AG, FO, FP, AT, ET e FRS. Para estas categorias a sua contribuição é sempre superior a 47,76% para a mistura A e 34,71% para a mistura B. Esta contribuição está associada à fase de produção do PP, e, portanto, quanto maior a incorporação de PP maior a contribuição. O perfil extrudido revelou ser o principal contribuidor de impacto nas categorias de: DOE, RI, EAD, EM, TH, OS, DRM e CA. A sua percentagem de contribuição é superior a 42,79% para a mistura A e 45,32% para a mistura B. O impacto ambiental associado ao perfil extrudido está associado ao processo de extrusão.

No cenário 2 foram utilizadas misturas constituídas por BS e PP, foi observado que a BS foi o principal contribuidor de impacto em quase todas as categorias, exceto OS, cujo principal contribuidor foi o perfil extrudido, devido ao processo de extrusão. A contribuição de impacto da BS foi sempre superior a 41,99% para C e 54,23% para D, enquanto a contribuição do perfil extrudido na categoria de OS foi de 57,44% para C e 55,82% para D.

No cenário 3, que consistiu na observação das misturas que incorporaram GBP e PPR, foi contemplado que o PPR foi o principal contribuidor de impactos ambientais nas categorias de EM e TH, com contribuições de impacto acima de 61,18% para a mistura E, e 50,09% para a mistura F. O aditivo foi o principal contribuidor de impacto na categoria de FRS, com uma contribuição de 39,70% para a mistura E, e 40,12% para a mistura F. Quanto às restantes categorias de impacto, o perfil extrudido foi o principal contribuidor, com contribuições superiores a 36,05% para a mistura E, e 37,89% para a mistura F.

Nestes materiais e produto (perfil extrudido), em todos eles, a principal fase responsável pelas contribuições de impacto nestas categorias, era a fase de produção. A fase de produção destes produtos esta associada ao consumo de vários recursos, especialmente, a fase de produção dos materiais de PP e BS.

4.1.2 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MISTURAS EM *ENDPOINT*

Nesta secção são descritos os resultados observados nas categorias de dano ambiental *endpoint*. As categorias SH, MA e DR foram as observadas.

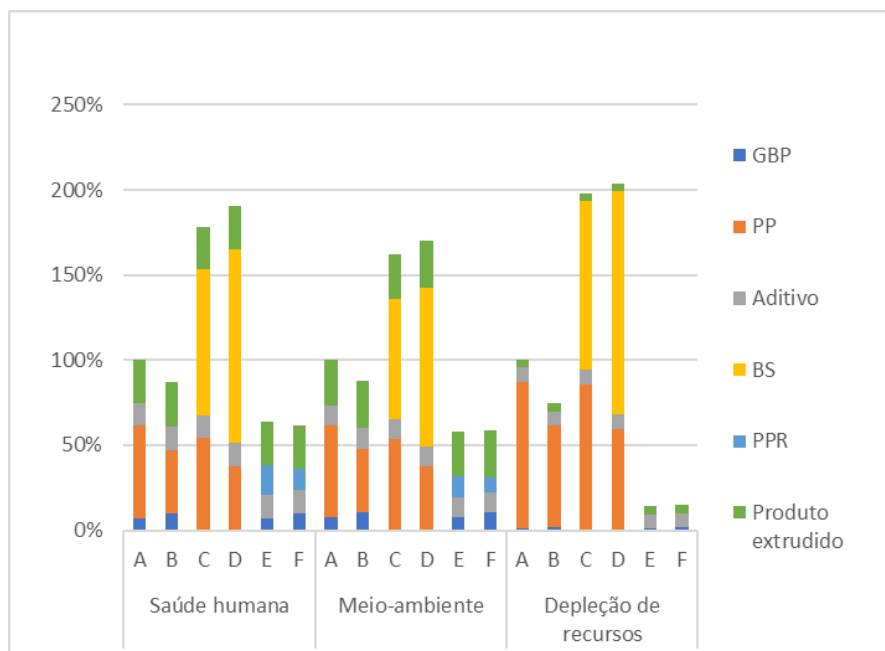
Neste estudo, foi realizada uma abordagem *endpoint*, que caracterizou a severidade das consequências das categorias de dano. Esta abordagem permitiu conhecer a gravidade das consequências que as misturas consideradas representaram para três áreas de proteção: saúde humana, meio-ambiente e recursos naturais.

Os valores dos resultados obtidos referentes às categorias de dano ambiental observadas encontram-se na Tabela 11, nas suas respetivas unidades.

Tabela 11 - Resultados das categorias de dano ambiental

Categorias	A	B	C	D	E	F
Saúde humana (DALY)	5,49E-05	4,79E-05	9,79E-05	1,05E-04	3,49E-05	3,40E-05
Meio-ambiente (species.yr)	5,05E-07	5,02E-07	5,91E-07	6,16E-07	4,31E-07	4,51E-07
Depleção de recursos (USD 2013)	6,4707	4,8214	12,7916	13,1848	0,9153	0,9745

Na Figura 8, encontram-se representados os resultados para cada categoria, em percentagem. Os resultados das diferentes misturas são apresentados em função dos resultados da da mistura A (100%).

Figura 8 - Resultados das categorias de dano *endpoint*

Na Figura 8 observa-se que no:

- Cenário 1, o PP foi o principal contribuidor de impacto em todas as categorias de dano, com contribuições superiores a 53,78% para a mistura A e 42,99% para a mistura B;
- Cenário 2, o BS foi o principal contribuidor de impacto em todas as categorias, seguindo-se o PP, também com elevadas contribuições de dano. A contribuição de BS foi superior a 43,23% para a mistura C e 54,61% para a mistura D. A contribuição de PP foi superior a 30,35% para a mistura C e 19,65% para a mistura D;

- Cenário 3, o produto extrudido foi o principal contribuidor de impacto nas categorias de SH e MA, com contribuições superiores a 39,50% para a mistura E, e 42,08% para a mistura F. Na categoria de DR o aditivo foi o principal contribuidor, com uma contribuição de 58,64% para a mistura E, e 57,24% para a mistura F.

Em todas estas categorias se evidenciou que a fase de produção destes materiais, era a principal fase responsável pela elevada contribuição de impacto.

Na Figura 9 encontra-se representada a categoria saúde humana, subdividida em subcategorias. Esta representação gráfica proporcionou um melhor conhecimento relativamente à representação de danos de cada subcategoria para a saúde humana.

Através da observação da Figura 9 é possível identificar quais são as principais subcategorias responsáveis pelo dano nesta categoria. Em todas as misturas é observado que as duas subcategorias predominantes são AG e FP.

Na Tabela 12 estão explícitas as percentagens de contribuição de dano de cada subcategoria, face a cada mistura.

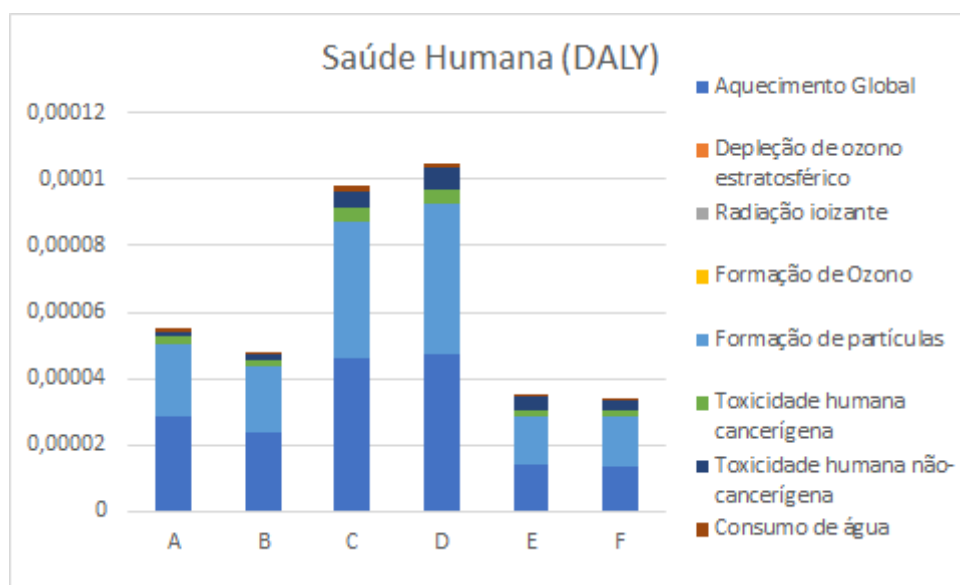


Figura 9 – Repartição dos danos da categoria Saúde Humana em subcategorias

Tabela 12 - Contribuição de danos ambientais das subcategorias AG e FP da categoria SH

Subcategoria	A	B	C	D	E	F
Aquecimento Global	51,47%	49,36%	47,02%	45,00%	39,36%	39,90%
Formação de partículas	40,05%	41,79%	41,95%	43,20%	42,64%	44,34%

Para melhor clareza relativamente aos produtos e fases responsáveis por estes impactos, estas subcategorias foram observadas com maior pormenor na Figura 10 e Figura 11.

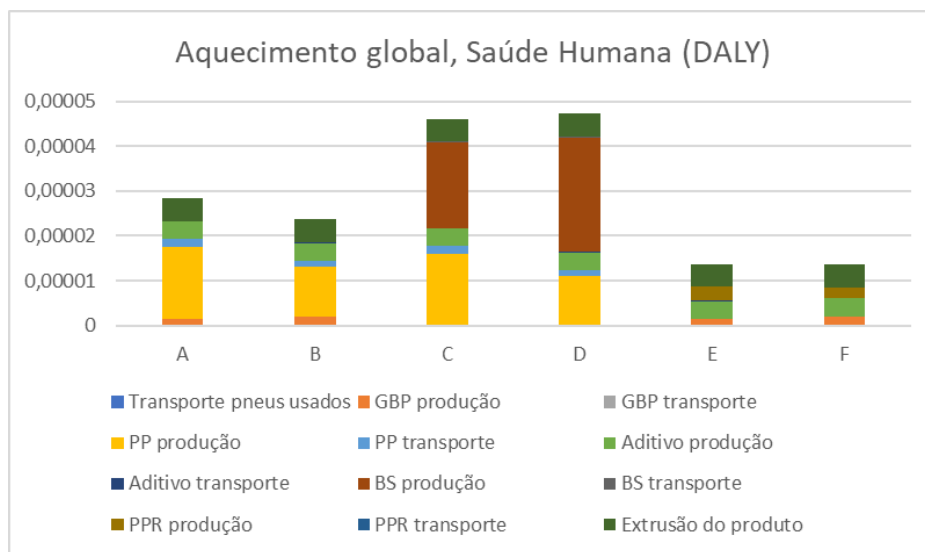


Figura 10 - Resultados da subcategoria AG da categoria SH

Na Figura 10 é possível observar quais foram os principais materiais responsáveis pela contribuição de impacto, como também foi possível observar quais foram as fases que mais contribuíram para esses resultados.

Visualmente, é possível observar que, nas misturas A e B a fase de produção de PP foi a principal contribuidora de impacto. Nas misturas C e D, a fase de produção de BS foi a principal contribuidora de impacto, seguindo-se também a fase de produção de PP. Nas misturas E e F, as principais contribuidoras de impacto foram: a fase de produção de aditivo e a fase de extrusão do produto.

Na Tabela 13 apresentam-se os contributos percentuais das principais fases contribuidoras de impacto em cada mistura, nas subcategorias de AG de SH.

Tabela 13 – Resultados em percentagem das principais fases contribuidoras de dano na subcategoria AG de SH

Fase	A	B	C	D	E	F
Produção de PP	56,73%	46,99%	34,83%	23,56%		
Produção de aditivo	13,40%	16,64%	8,22%	8,35%	27,40%	28,72%
Produção de BS			41,63%	53,76%		
Extrusão	17,49%	21,74%	10,74%	10,90%	36,04%	37,88%

Na Figura 11 encontram-se representados os resultados obtidos para cada mistura, na subcategoria de FP da categoria SH.

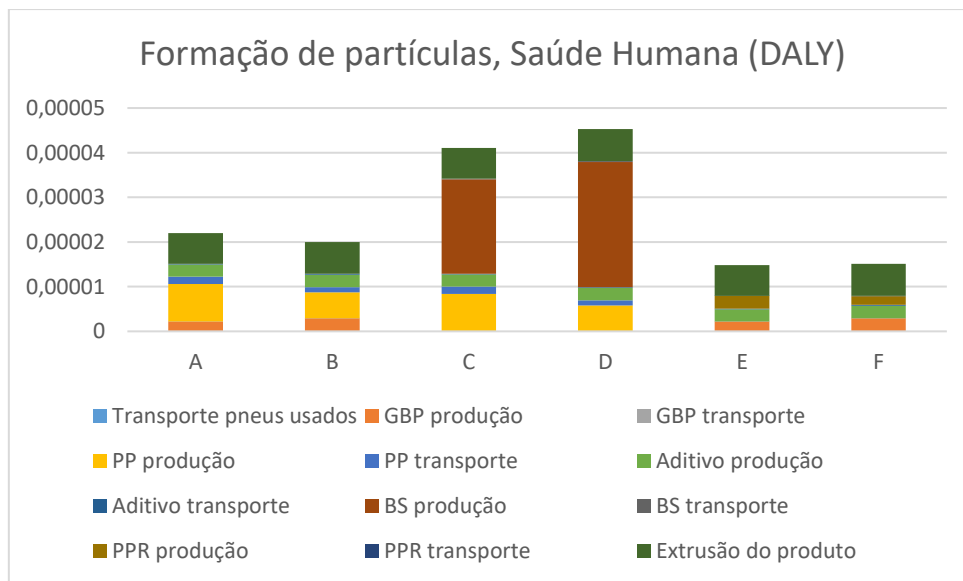


Figura 11 - Resultados da subcategoria FP da categoria SH

Na Figura 11 é possível observar quais foram os principais materiais responsáveis pela contribuição de impacto, como também foi possível identificar quais foram as fases que mais contribuíram para esses resultados.

É possível identificar que, nas misturas A e B a fase de produção de PP foi a principal contribuidora de impacto, seguindo-se a extrusão. Nas misturas C e D, a fase de produção de BS foi a principal contribuidora de impacto. Nas misturas E e F, a principal contribuidora de impacto foi a fase de extrusão do produto.

Na Tabela 14 apresentam-se os contributos percentuais das principais fases contribuidoras de dano em cada mistura.

Tabela 14 - Resultados em percentagem das principais fases contribuidoras de dano na subcategoria FP de SH

Fase	A	B	C	D	E	F
Produção de PP	37,97%	28,85%	20,41%	12,84%		
Produção de BS			51,53%	61,86%		
Extrusão	31,34%	35,78%	16,78%	15,82%	46,37%	47,51%

Na Figura 12 ilustram-se os resultados referentes à categoria do Meio-Ambiente, desdobrados em subcategorias.

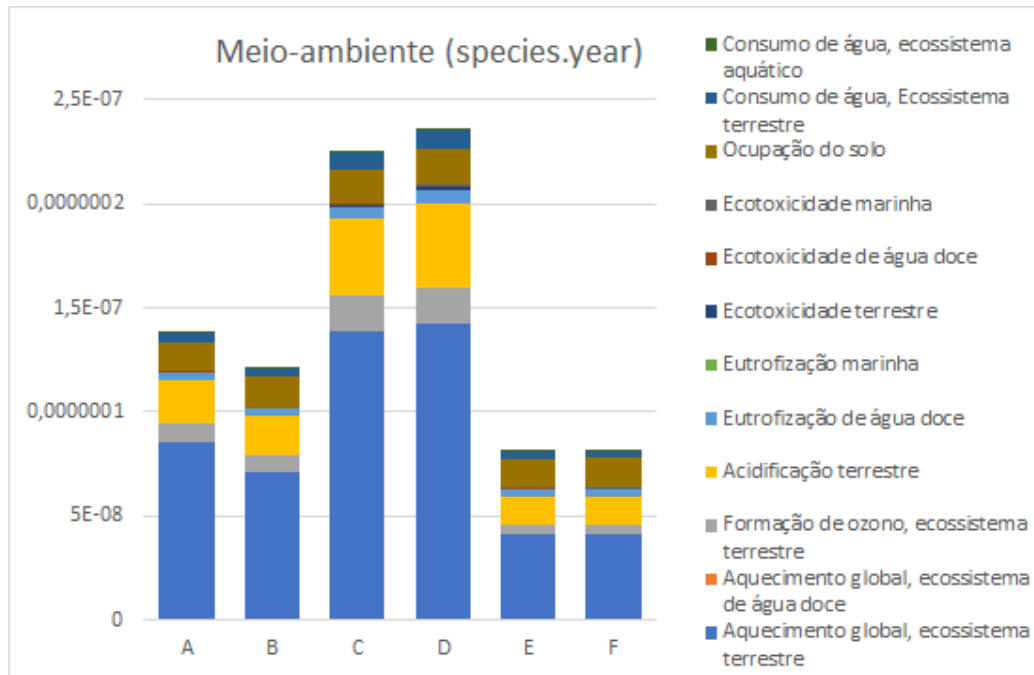


Figura 12 - Resultados da categoria Meio-ambiente em subcategorias

Através da observação da Figura 12, é possível identificar que a principal subcategoria responsável pelo impacto nesta categoria é o aquecimento global, ecossistema terrestre. Esta categoria é responsável por mais de metade do dano, com contribuições percentuais apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados em percentagem da subcategoria AG, ecossistema terrestre de MA

Categoria	A	B	C	D	E	F
Aquecimento global, ecossistema terrestre	61,73%	59,00%	61,93%	60,58%	51,38%	50,52%

Esta subcategoria foi representada com mais detalhe na Figura 13, com o intuito de identificar os principais contribuidores, nomeadamente materiais e fases responsáveis.

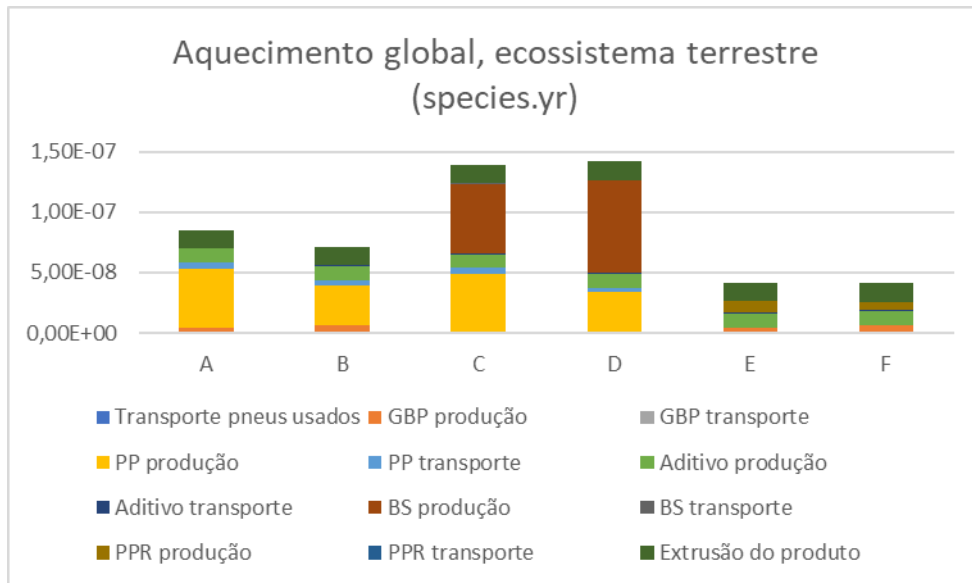


Figura 13 - Resultados da subcategoria AG, ecossistema terrestre, da categoria MA

Assim, na Figura 13 é possível observar quais foram os principais contribuidores de dano nesta subcategoria nas diferentes misturas.

Nas misturas A e B, a fase de produção de PP foi a principal contribuidora de dano. Nas misturas C e D, a fase de produção de BS foi a principal contribuidora de dano, seguindo-se também a fase de produção de PP. Nas misturas E e F, as principais fases contribuidoras de dano foram a fase de extrusão do produto e produção do aditivo. As fases de produção de PP, BS e aditivo possuem grandes contribuições de dano nesta subcategoria associadas a processos de refinamento de matérias-primas de origem fóssil para a sua produção (Sato & Ogawa, 2009; US Environmental Protection Agency, 1991). O dano associado à extrusão está relacionado à utilização de energia elétrica.

Na Tabela 16 apresentam-se os contributos em percentagem das principais fases contribuidoras de impacto em cada mistura.

Tabela 16 - Resultados em percentagem das principais fases contribuidoras de impacto na subcategoria AG, ecossistema terrestre de MA

Fase	A	B	C	D	E	F
Produção de PP	56,74%	47,00%	34,84%	23,57%		
Produção de aditivo	13,40%	16,64%	8,22%	8,35%	27,71%	29,09%
Produção de BS			41,63%	53,76%		
Extrusão	17,49%	21,73%	10,74%	10,90%	36,18%	37,98%

Na Figura 14 apresenta-se a ilustração dos resultados referentes à categoria de depleção de recursos, dividida em subcategorias.



Figura 14 - Resultados da categoria depleção de recursos em subcategorias

A subcategoria de depleção de recursos fósseis demonstrou ser o principal contribuidor de impacto nesta categoria, com uma contribuição superior a 99% em todas as misturas.

Analisando com mais detalhe na Figura 15, que apresenta esta subcategoria por fases dos materiais, observaram-se quais as principais fases contribuidoras para estes resultados.

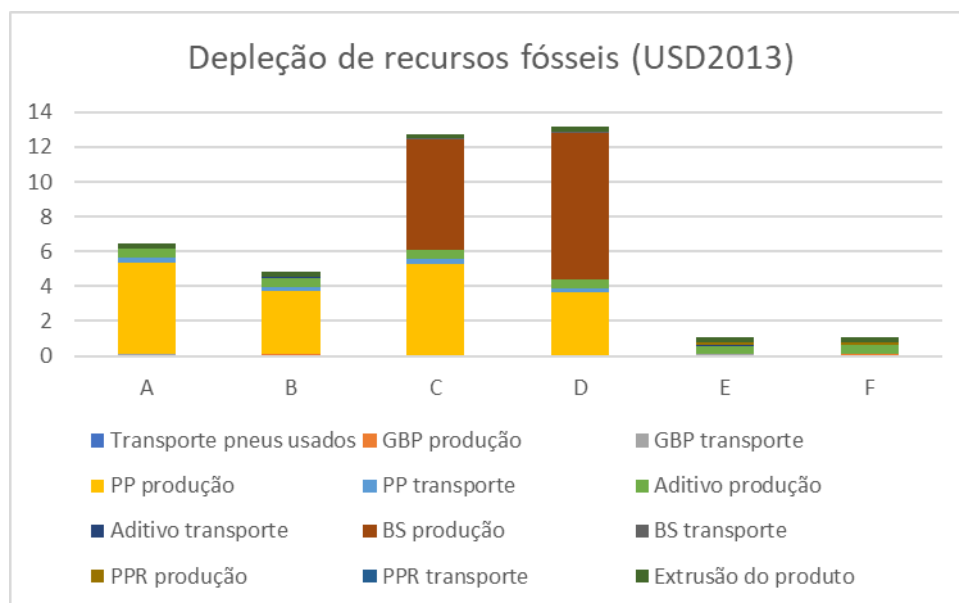


Figura 15 - Resultados da subcategoria DRF da categoria DR

Pela análise da Figura 15, é observável que nas misturas A e B, a fase de produção de PP foi a mais impactante. Nas misturas C e D, a fase de produção de BS foi a mais impactante, em conjunto com a fase de produção de PP. Nas misturas E e F, o principal contribuidor de impacto foi a fase de produção de aditivo.

Na Tabela 17 encontram-se as contribuições de cada fase em percentagens.

Tabela 17 - Resultados em percentagem das principais fases contribuidoras de dano na subcategoria DRF de DR

Fase	A	B	C	D	E	F
Produção de PP	81,41%	75,74%	41,24%	27,75%		
Produção de aditivo	7,80%	10,89%	3,95%	3,99%	47,86%	49,19%
Produção de BS			49,77%	63,92%		
Extrusão	4,44%	6,20%	2,25%	2,27%	27,24%	27,99%

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO

Nesta secção os resultados da ACV das misturas são analisados e comparados entre si. Os benefícios e riscos de cada mistura são observados e identificados. São apresentadas as vantagens e desvantagens oferecidas pelas misturas entre si.

Numa fase inicial foi realizada a comparação e análise das misturas do mesmo cenário em 4.2.1, numa fase posterior, foi realizada a comparação e análise dos cenários entre si em 4.2.2.

4.2.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MISTURAS DE CADA CENÁRIO

4.2.1.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MISTURAS DE CADA CENÁRIO EM MIDPOINT

Cenário 1

Analisando na Figura 16 as misturas do cenário-base, que utilizaram na sua constituição GBP e PP. As misturas observadas neste cenário são a mistura A e a mistura B.

A mistura A apresentou melhor desempenho ambiental do que a mistura B nas categorias: DOE, RI, EAD e OS, enquanto a mistura B revelou apresentar melhor desempenho ambiental do que a mistura A nas categorias: AG, FO, FP, AT, EM, ET, TH, DRM, DRF e CA.

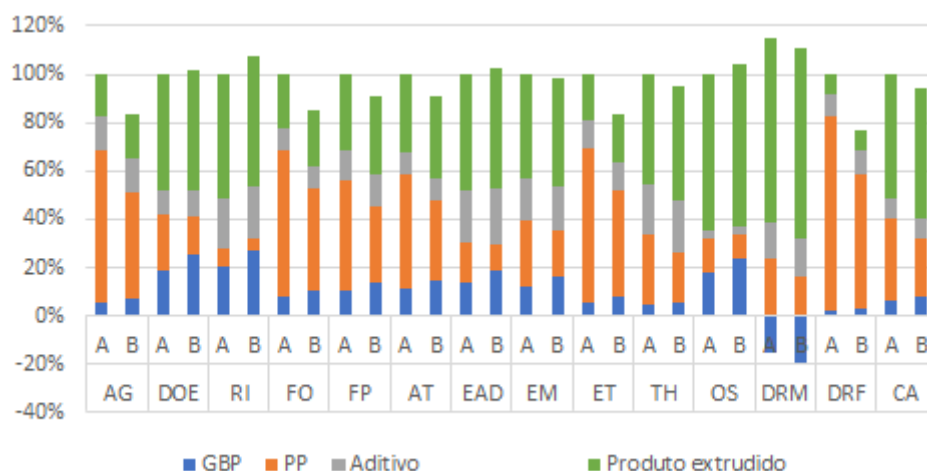


Figura 16 - Resultados *midpoint* em percentagem das misturas do cenário base

O melhor desempenho ambiental obtido pela mistura B nas categorias AG, FO, FP, AT, EM, ET, TH, DRF e CA deve-se ao facto de esta mistura incorporar uma menor proporção de PP. Este material tem associado elevado impacto por unidade de massa devido à sua fase de produção. Na categoria de DRM, o melhor desempenho da mistura B deve-se ao facto de o material GBP possuir impacto negativo por massa (os impactos negativos estão associados aos impactos evitados) e deve-se também ao facto de incorporar uma menor quantidade de PP. Quanto ao melhor desempenho ambiental apresentado pela mistura A nas categorias DOE, RI, EAD e OS, deve-se principalmente à incorporação de maior quantidade de massa de GBP e produto extrudido, uma vez que a mistura A possuiu menor massa do que a mistura B, na fase de extrusão.

Na Tabela 18 encontra-se a percentagem de redução de impacto que a mistura B ofereceu face à mistura A.

Tabela 18 - Percentagem de redução de impacto oferecida pela mistura B face à mistura A, *midpoint*

Categoria	Benefício ambiental originado por B face a A
AG	16,36%
FO	14,77%
FP	8,96%
AT	9,45%
EM	1,83%
ET	16,46%
TH	5,00%
DRM	8,52%
DRF	22,96%
CA	6,10%

Na Tabela 19 encontra-se a percentagem de redução de impacto que a mistura A ofereceu face à mistura B.

Tabela 19 - Percentagem de redução de impacto oferecida pela mistura A face à mistura B, *midpoint*

Categoria	Benefício ambiental originado por A face a B
DOE	1,38%
RI	6,82%
EAD	2,27%
OS	3,78%

Cenário 2

No cenário 2, que incorporou na sua constituição apenas material virgem (BS e PP), observou e analisou as misturas C e D.

Na Figura 17 estão apresentados os resultados da mistura C e D do cenário 2 em percentagens. Os resultados estão projetados de C para D.

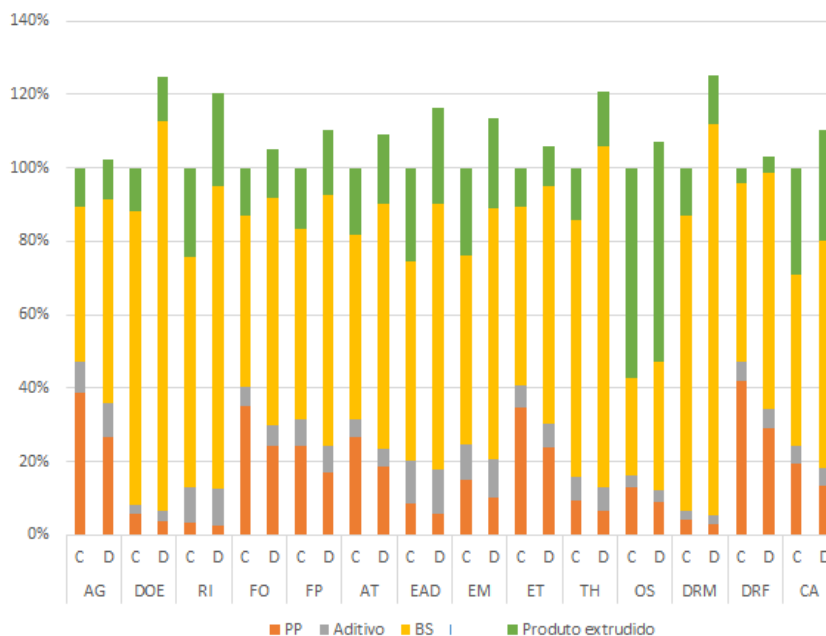


Figura 17 - Resultados *midpoint* em percentagem das misturas do cenário 2

Na análise da Figura 17 observou-se que a mistura C apresentou melhor desempenho ambiental em todas as categorias relativamente à mistura D. O material determinante que contribuiu para esse resultado foi a BS, devido ao facto de quantidade de borracha virgem incorporada ter sido menor. Este material (BS) possuiu elevado impacto por unidade de massa, especialmente, devido à sua fase de produção.

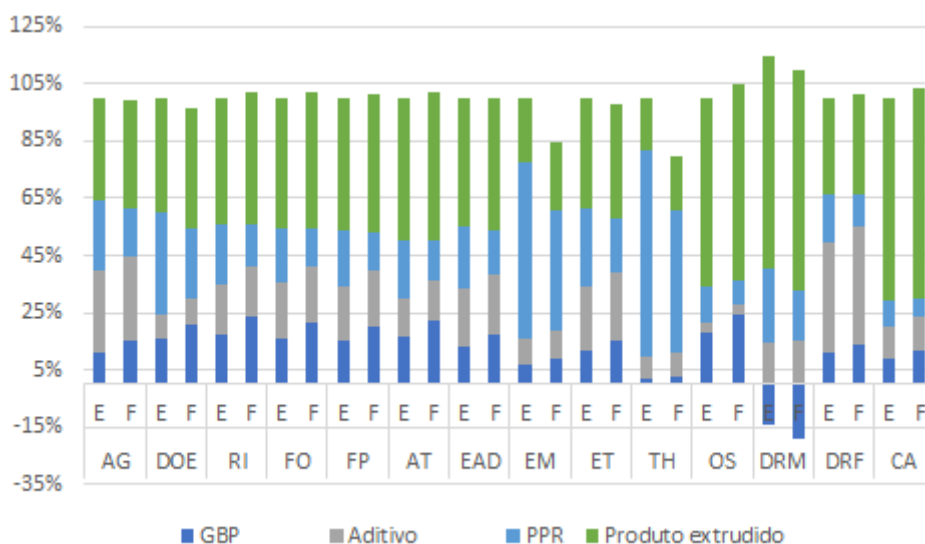
Na Tabela 20 evidenciam-se os resultados, em percentagens do benefício ambiental, oferecido pela mistura C face à mistura D.

Tabela 20 - Percentagem de benefício ambiental oferecido pela mistura C face à mistura D, *midpoint*

Categoria	Benefício ambiental originado por C face a D
Aquecimento Global	2,39%
Depleção do Ozono Estratosférico	19,83%
Radiação Ionizante	16,99%
Formação de ozono	4,84%
Formação de partículas	9,27%
Acidificação terrestre	8,20%
Eutrofização de água doce	14,16%
Eutrofização marinha	11,83%
Ecotoxicidade	5,46%
Toxicidade humana	17,12%
Ocupação do solo	6,52%
Depleção de recursos minerais	20,20%
Depleção de recursos fósseis	3,11%
Consumo de água	9,48%

Cenário 3

Prosseguindo para o cenário 3, que incorporou na sua constituição material reciclado (GBP e PPR) e denominou as suas misturas de mistura E e mistura F. Na Figura 18 estão apresentados os resultados da mistura E e F do cenário 3 em percentagens.

Figura 18 - Resultados *midpoint* em percentagem das misturas do cenário 3

A mistura E apresentou melhor desempenho ambiental do que a mistura F, nas categorias de: RI, FO, FP, AT, EAD, OS, DRF e CA, enquanto que a mistura F possuiu melhor desempenho ambiental do que a mistura E nas categorias de: AG, DOE, EM, ET, TH e DRM.

Nas categorias em que a mistura E apresentou melhor desempenho ambiental do que a mistura F, deveu-se às quantidades de massa consideradas nos constituintes nas misturas. Uma vez que a mistura F incorporou uma massa superior de materiais do que a mistura E, nomeadamente GBP, aditivo e massa a ser extrudada, contribuiu para que essa mistura ultrapassasse em impacto ambiental a mistura E.

Nas categorias em que a mistura F apresentou melhor desempenho ambiental do que a mistura E, tal deveu-se às quantidades em massa de PPR incorporados. A fase de produção de PPR tem elevado impacto por massa nessas categorias. Por essa razão, a mistura que possuiu menor quantidade deste material possuiu melhor desempenho.

Na Tabela 21 evidenciam-se os resultados em percentagens do benefício ambiental oferecido pela mistura E face à mistura F.

Tabela 21 - Percentagem de benefício ambiental oferecido pela mistura E face à mistura F, *midpoint*

Categoria	Benefício ambiental originado pela mistura E face à mistura F
RI	1,68%
FO	1,74%
FP	1,44%
AT	1,76%
EAD	0,25%
OS	4,62%
DRF	1,30%
CA	3,11%

Na Tabela 22 evidenciam-se os resultados em percentagens do benefício ambiental oferecido pela mistura F face à mistura E.

Tabela 22 - Percentagem de benefício ambiental oferecido pela mistura F face à mistura E, *midpoint*

Categoria	Benefício ambiental originado pela mistura F face à mistura E
AG	1,09%
DOE	3,84%
EM	15,35%
ET	2,20%
TH	20,37%
DRM	9,05%

4.2.1.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MISTURAS DE CADA CENÁRIO EM ENDPOINT

Nesta secção as misturas de cada cenário foram comparadas e analisadas em relação a três categorias *endpoint*.

Cenário 1

No cenário 1 foi evidenciado que a mistura B apresenta o melhor desempenho em todas as categorias. Este resultado está associado à incorporação de PP na mistura. Este material possui elevado impacto por massa em relação aos outros materiais, especialmente na categoria de DR; por essa razão, a mistura que incorporou uma maior quantidade deste material provoca maior dano. Na Figura 19 estão apresentados os resultados da mistura A e da mistura B do cenário 1 em percentagens.

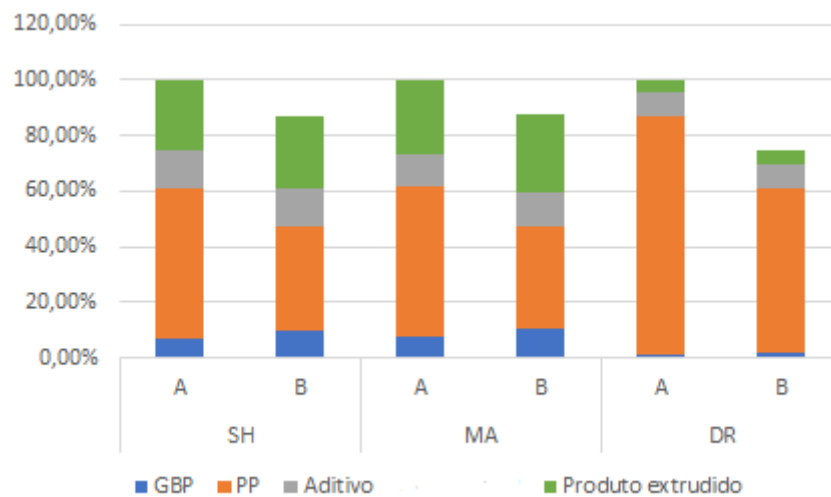


Figura 19 - Resultados *endpoint* em percentagem das misturas A e B do cenário 1

Na Tabela 23 apresentam-se as percentagens de benefício ambiental que a mistura B tem em relação à mistura A.

Tabela 23 - Resultados *endpoint* em percentagem das misturas A e B do cenário 1

Categoria	Benefício ambiental originado pela mistura B em relação à mistura A
SH	12,75%
MA	12,45%
DR	25,49%

Cenário 2

No cenário 2, as misturas C e D foram comparadas e analisadas. Na Figura 20 encontram-se os resultados em percentagens, para cada mistura face a cada categoria.



Figura 20 - Resultados *endpoint* em percentagem das misturas C e D do cenário 2

A mistura C apresentou o melhor desempenho em todas as categorias. Este resultado está associado à incorporação de BS na mistura. Este material possui elevado impacto por massa, por esse facto, a mistura que incorporou uma maior quantidade deste material causa maior dano. Na Tabela 24 apresentam-se as percentagens de benefício ambiental que a mistura C apresentou em relação à mistura D.

Tabela 24 - Benefício ambiental em percentagem que a mistura C ofereceu em relação à mistura D

Categoria	Benefício ambiental originado pela mistura C em relação à mistura D
SH	7,04%
MA	4,74%
DR	3,07%

Cenário 3

No cenário 3, as misturas E e F foram comparadas e analisadas. Na Figura 21 encontram-se os resultados para cada mistura em percentagem, face a cada categoria.

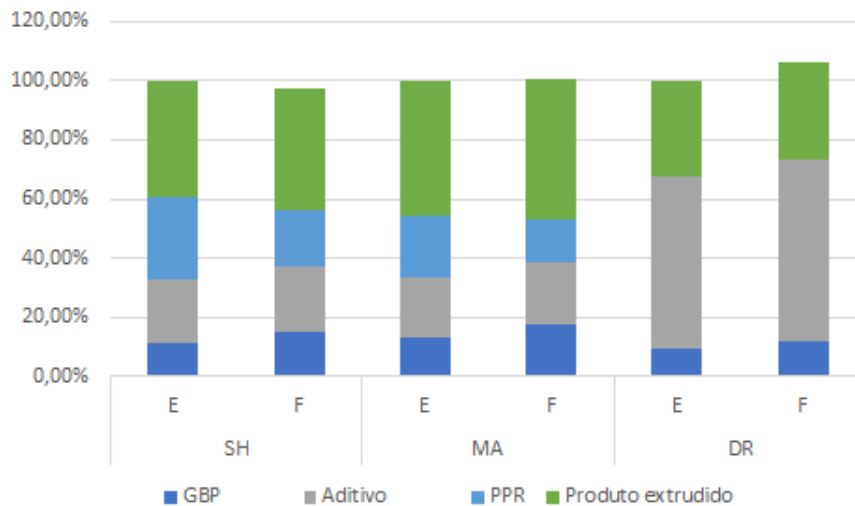


Figura 21 - Resultados *endpoint* das misturas E e F do cenário 3, em percentagem

A mistura E apresentou melhor desempenho ambiental do que a mistura F nas categorias de MA e DR. O que contribuiu para esse resultado foi a menor incorporação em massa de material na fase de extrusão, e por sua vez de materiais, nomeadamente GBP e aditivo, em comparação com a mistura F. A mistura F tem 2,42% melhor desempenho do que a mistura E na categoria de SH, dado que incorpora uma menor proporção de PPR.

Na

Tabela 25 apresentam-se as percentagens de benefício ambiental que a mistura E ofereceu em relação à mistura F.

Tabela 25 - Benefício ambiental em percentagem que a mistura E ofereceu em relação à mistura F

Categoria	Benefício ambiental originado pela mistura E em relação à mistura F
MA	0,59%
DR	6,50%

4.2.2 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

Nesta secção analisaram-se e compararam-se entre si os diferentes cenários. Os impactos e danos ambientais mitigados e originados foram identificados e observados entre os cenários. As comparações realizadas entre os cenários tiveram a finalidade de observar o potencial de redução de impacto de misturas com diferentes materiais.

Na secção 4.2.2.1 foi realizada a comparação entre cenários baseada na caracterização *midpoint*.

Na secção 4.2.2.2 foi realizada a comparação entre cenários baseada na caracterização *endpoint*.

4.2.2.1 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES CENÁRIOS EM MIDPOINT

Nesta secção os resultados da caracterização *midpoint* dos diferentes cenários foram comparados entre si.

Cenário 1 vs Cenário 2

Observando a Figura 7 e comparando o cenário-base com o cenário que utilizou material virgem (cenário 2), foi possível observar que o cenário-base apresenta melhor desempenho ambiental em todas as categorias. O que distingue ambos os cenários é o tipo de borracha utilizada. A utilização de borracha reciclada de pneu originou menos impactos ambientais do que a utilização de borracha virgem.

Na Tabela 26 apresenta-se a redução percentual de impacto originada pelas misturas do cenário 1 em relação às misturas do cenário 2 para todas as categorias *midpoint*.

Tabela 26 – Resultados *midpoint* da redução de impacto originada pelas misturas do cenário 1 face ao cenário 2

Categoria	Redução de impacto originada pela mistura A em relação a:		Redução de impacto originada pela mistura B em relação a:	
	C	D	C	D
AG	38,60%	40,07%	48,63%	49,85%
DOE	75,47%	80,33%	75,13%	80,06%
RI	52,64%	60,68%	49,17%	57,81%
FO	42,18%	44,98%	50,73%	53,11%
FP	46,46%	51,42%	51,26%	55,78%
AT	44,00%	48,59%	49,29%	53,45%
EAD	47,26%	54,72%	46,04%	53,68%
EM	44,68%	51,23%	45,70%	52,12%
ET	45,59%	48,56%	54,54%	57,03%
TH	68,74%	74,09%	70,30%	75,39%
OS	10,74%	16,57%	7,24%	13,29%
DRM	82,43%	86,31%	84,31%	87,48%
DRF	47,35%	48,99%	59,44%	60,70%
CA	43,14%	48,53%	46,60%	51,67%

Era esperado que as misturas cuja composição tem as mesmas proporções de borracha e PP originassem os mesmos desempenhos ambientais nos diferentes cenários, isto é, se A apresentou maior impacto do que B no cenário 1, então também C deveria apresentar maior impacto do que D no cenário 2. Porém isso não foi observado, uma vez que a BS tem elevado impacto ambiental em comparação ao GBP. Estas manifestações foram evidenciadas nas categorias: AG, DOE, FP, AT, EAD, ET, TH, DRM, DRF e CA.

A utilização de GBP em vez de BS permitiu obter reduções de impacto ambiental em todas as categorias. Foi evidenciado que a redução de impacto proporcionado pela substituição de BS por GBP é quase sempre superior a metade dos impactos (exceto na categoria de OS que foi cerca de 7,29-13,29%). A utilização de GBP apresentou potencial de mitigação de impactos ambientais face à utilização de borracha virgem.

Cenário 1 vs Cenário 3

Comparando e analisando o cenário-base com o cenário 3, que utilizou material reciclado (GBP e PPR) na Figura 7, foi observado que as misturas do cenário 3 demonstraram possuir melhor desempenho ambiental do que as misturas do cenário 1 em quase todas as categorias; em outras categorias (OS e DRM) foi observado que as duas misturas com melhor desempenho ambiental pertenciam a cada um dos cenários, como vamos ver a seguir.

Na Tabela 27 apresenta-se a redução percentual de impacto originada pelas misturas do cenário-base em relação às misturas do cenário 3 para todas as categorias.

Tabela 27 - Resultados *midpoint* da redução de impacto oferecida por E face a A e B

Categoria	Redução de impacto originada pela mistura E em relação a:		Redução de impacto originada pela mistura F em relação a:	
	A	B	A	B
AG	51,47%	42,00%	51,99%	42,63%
FO	50,97%	42,47%	50,10%	41,45%
FP	32,42%	25,77%	31,43%	24,68%
AT	34,59%	27,76%	33,42%	26,47%
ET	50,03%	40,19%	51,13%	41,51%
OS	2,57%	6,26%	-	1,71%
DRM	-	-	6,81%	-
DRF	75,85%	68,65%	75,53%	68,24%
CA	27,46%	22,75%	25,12%	20,26%

O que distinguiu estes dois cenários foi a incorporação de PP; um cenário incorporou PP virgem e outro cenário incorporou PP reciclado. Para obtenção dos resultados apresentados na

Tabela 27, nestas categorias, foi evidenciado que as misturas que incorporaram PPR originaram impactos ambientais inferiores às que incorporaram PP. Porém, estas evidências não foram verdade para todas as categorias, conforme se evidenciou na Figura 7 e na Tabela 28.

A Tabela 28 apresenta a redução percentual de impacto originada pelas misturas do cenário-base em relação às misturas do cenário 3, para todas as categorias.

Tabela 28 - Resultados *midpoint* da redução de impacto oferecida pelas misturas do cenário 3 face cenário 1

Categoria	Redução de impacto oferecida pela mistura A em relação a:		Redução de impacto oferecida pela mistura B em relação a:	
	E	F	E	F
DOE	16,30%	12,96%	15,13%	11,75%
RI	14,76%	16,19%	8,52%	10,06%
EAD	6,26%	6,50%	4,09%	4,33%
EM	46,83%	37,19%	47,80%	38,34%
HT	59,81%	49,53%	61,82%	52,06%
DRM	2,41%	-	10,72%	1,83%

Nas categorias mencionadas na Tabela 28, foi observado que as misturas do cenário-base originaram impactos ambientais inferiores às do cenário 3; este facto deveu-se aos impactos associados à fase de produção de PPR que são superiores aos impactos associados à fase de produção de PP nessas categorias.

Na categoria OS, conforme observado na Figura 7, as duas misturas com melhor desempenho ambiental foram a mistura E, e a mistura A, e não um cenário ou outro. Nesta categoria apesar do PP apresentar mais impacto do que o PPR, este fator não foi impactante o suficiente para determinar o melhor cenário. O fator responsável para determinar as duas melhores misturas foi a quantidade de GBP incorporada, por esse facto, as misturas que incorporaram uma quantidade inferior de GBP possuíram melhores resultados ambientais: a mistura A e a mistura E.

Na categoria DRM, foi observado um comportamento semelhantemente inverso ao da categoria OS. Nesta categoria, as misturas que incluíram uma quantidade maior de GBP originaram menor impacto, neste caso, B e F. O GBP apresentou impacto positivo (impacto mitigado) nesta categoria, representando a redução de extração de metais. Por essa razão, a mistura que incluiu uma quantidade superior de GBP evitou mais impactos e por isso obteve melhor desempenho ambiental, como evidenciado. A mistura B obteve melhor desempenho do que F nesta categoria visto que o impacto do PP foi inferior ao do PPR.

Na observação da Figura 7 era expectável que as misturas cuja composição tem as mesmas proporções de borracha e PP/PPR manifestassem os mesmos comportamentos nos diferentes cenários, isto é, se A apresentou mais impacto do que B no cenário 1, então também E devia apresentar mais impacto do que F no cenário 3, porém isso não foi observado. Era esperado no cenário 3, a mistura E originar maior impacto do que a mistura F, visto que a mistura A tem maior impacto do que a mistura B no cenário 1; porém no cenário 3 o impacto ambiental associado ao PPR não foi suficientemente impactante como no cenário 1, por isso a mistura que incorporou mais massa de

materiais foi a mais impactante. Estas observações foram evidenciadas nas categorias: DOE, FO, FP, AT e CA.

Cenário 2 vs Cenário 3

Estes dois cenários foram comparados com a intenção de averiguar o potencial de impactos evitados entre um cenário que considera apenas materiais novos e virgens (BS e PP) e um cenário que considera materiais reciclados (GBP e PPR).

Na Tabela 29 apresentam-se os resultados em percentagem de impactos evitados que as misturas do cenário 3 originaram face às misturas do cenário 2.

Tabela 29 - Resultados *midpoint* da redução de impacto oferecida pelas misturas do cenário 3 face ao cenário 2

Categoria	Redução de impacto originada pela mistura E em relação a:		Redução de impacto originada pela mistura F em relação a:	
	C	D	C	D
AG	70,20%	70,91	70,53%	71,23%
DOE	70,69%	76,50%	71,82%	77,40%
RI	44,44%	53,88%	43,49%	53,09%
FO	71,65%	73,02%	71,15%	72,55%
FP	63,82%	67,17%	63,29%	66,69%
AT	63,37%	66,37%	62,72%	65,77%
EAD	43,73%	51,70%	43,59%	51,58%
EM	-	8,28%	11,93%	22,36%
ET	72,81%	74,30%	73,41%	74,86%
TH	22,22%	35,53%	38,06%	48,66%
OS	13,04%	18,71%	8,83%	14,78%
DRM	82,43%	85,97%	84,02%	87,24%
DRF	87,28%	87,68%	87,12%	87,52%
CA	58,75%	62,66%	57,42%	61,46%

A utilização de GBP e PPR em vez de BS e PP permitiu obter reduções de impacto ambiental em quase todas as categorias, exceto para a mistura E na categoria EM. O PPR nessa categoria apresenta maior impacto ambiental associado do que o PP. Apesar da mistura C constituir uma borracha com impacto superior à da mistura E, o impacto de PPR foi de tal forma superior que resultou que a mistura E obtivesse mais 3,88% de impacto ambiental do que a mistura C.

De um modo geral, tendo em conta todas as categorias observadas, foi evidenciado que a redução de impacto proporcionada pela substituição de BS e PP por GBP e PPR foi quase sempre mais de metade dos impactos (exceto na categoria de EM). A utilização

de GBP e PPR apresentou potencial de mitigação de impactos ambientais face às alternativas convencionais (BS e PP).

4.2.2.2 COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES CENÁRIOS EM ENDPOINT

Nesta secção foi realizada a análise e comparação dos diferentes cenários com base na caracterização *endpoint*. O potencial de redução de dano ambiental foi analisado entre as misturas de cada cenário.

Cenário 1 vs Cenário 2

Os danos do cenário 1 e do cenário 2 foram analisados e comparados. Observando a Figura 8, evidencia-se que as misturas do cenário 1 obtiveram melhor desempenho ambiental do que as misturas do cenário 2 em todas as categorias de dano. A utilização de GBP em vez de BS demonstrou evitar os danos para a SH, MA e DR.

Na Tabela 30 encontra-se, em percentagem, o dano evitado pelas misturas do cenário 1 face ao cenário 2 para cada categoria.

Tabela 30 - Resultados *endpoint* da redução de dano oferecida pelas misturas do cenário 1 face ao cenário 2

Categoria	Redução de impacto originada pela mistura A em relação a:		Redução de impacto originada pela mistura B em relação a:	
	C	D	C	D
SH	43,92%	47,61%	51,07%	54,29%
MA	38,40%	41,18%	46,07%	48,51%
DR	49,41%	50,92%	62,31%	63,43%

Cenário 1 vs Cenário 3

Os danos do cenário 1 e do cenário 3 foram analisados e comparados. Observando a Figura 10, evidencia-se que as misturas do cenário 3 obtiveram melhor desempenho ambiental do que as misturas do cenário 1 em todas as categorias de dano. A utilização de PPR em vez de PP demonstrou mitigar danos para as categorias SH, MA e DR.

Na

Tabela 31 encontra-se, em percentagem, o dano evitado pelas misturas do cenário 3 face ao cenário 1 para cada categoria.

Tabela 31 - Resultados *endpoint* da redução de dano oferecida pelas misturas do cenário 3 face ao cenário 1

Categoria	Redução de impacto originada pela mistura E em relação a:		Redução de impacto originada pela mistura F em relação a:	
	A	B	A	B
SH	36,53%	27,26%	38,07%	29,02%
MA	41,70%	33,40%	41,35%	33,01%
DR	86,01%%	81,22%	85,10%	80,00%

Cenário 2 vs Cenário 3

Os danos do cenário 2 e o cenário 3 foram analisados e comparados. Observando a Figura 10, evidencia-se que as misturas do cenário 3 obtiveram melhor desempenho ambiental do que as misturas do cenário 2 em todas as categorias de dano. Como expectável, a utilização de GBP e PPR em vez de BS e PP demonstrou mitigar danos para as categorias: SH, MA e DR.

Na Tabela 32 encontra-se, em percentagem, o dano evitado pelas misturas do cenário 3 face ao cenário 2 para cada categoria.

Tabela 32 - Resultados *endpoint* da redução de dano oferecida pelas misturas do cenário 3 face ao cenário 2

Categoria	Redução de impacto originada pela mistura E em relação a:		Redução de impacto originada pela mistura F em relação a:	
	C	D	C	D
SH	64,41%	66,75%	65,27%	67,55%
MA	64,08%	65,71%	63,87%	65,51%
DR	92,92%	93,13%	92,46%	92,69%

CONCLUSÕES

- 5.1 CONCLUSÕES
- 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido pretendeu avaliar o desempenho ambiental de um perfil de proteção rodoviária produzido pelo processo de extrusão utilizando misturas alternativas. Foram considerados 3 cenários com duas misturas cada. O cenário base considerou a mistura de granulado de borracha de pneu (GBP) e polipropileno (PP): tendo a mistura A 55% de GBP e 45% de PP e a mistura B 70% de GBP e 30% PP. Mantendo estas proporções, cada cenário considerou também duas misturas alternativas. No cenário de material virgem, consideraram-se materiais não reciclados - borracha sintética (BS) e PP, e no cenário de material reciclado consideraram-se misturas com GBP e PP reciclado (PPR). Assim o ciclo de vida de seis misturas foi modelado com base em dados primários (fornecido pelos parceiros do projeto) e secundários (retirados da literatura e da base de dados *ecoinvent* 3.6). O impacto ambiental do perfil produzido com estas misturas foi estimado e comparado, utilizando o método ReCiPe..

Neste estudo, a mistura B provou ser ambientalmente melhor do que a mistura A, quer na caracterização *midpoint* quer na caracterização *endpoint*. O fator determinante para esse resultado foi a incorporação de uma quantidade menor de PP, uma vez que a sua fase de produção possuiu elevado impacto e dano ambiental na maioria das categorias. Na caracterização *midpoint*, a mistura B apresentou entre 1,8-23% menos impactos ambientais e na caracterização *endpoint* apresentou entre 12,5-25,5% menos danos ambientais.

Adicionalmente, outros dois cenários foram considerados para comparação com o cenário base. O objetivo da consideração destes dois cenários visou avaliar e comparar o potencial de impactos e danos ambientais mitigados e/ou proporcionados face ao cenário base (cenário 1).

No cenário de material virgem (cenário 2), foi avaliado o impacto ambiental de incorporação de BS e PP nas misturas. Nesse cenário, a mistura que incorporou menos borracha virgem (mistura C) obteve menor impacto ambiental. Relativamente à comparação entre o cenário 2 e o cenário 1, visou analisar a influência de borrachas diferentes nas misturas, isto é, borracha reciclada e borracha virgem. Nesta comparação

foi observado que as misturas que incorporaram borracha reciclada (GBP) apresentaram entre 7,2-87,5% melhor desempenho ambiental do que as misturas que incorporaram borracha virgem (BS) em todas as categorias de impacto, especialmente as categorias DRM, DOE e TH, que apresentaram benefícios ambientais superiores a 68,7%; e entre 38,4-63,4% de dano ambiental. Estes resultados demonstraram que a utilização de borracha reciclada (GBP) de pneu em fim-de-vida apresenta benefícios ambientais face à utilização de material virgem (BS).

No cenário 3, foi avaliado o impacto ambiental de incorporação de GBP e PPR nas misturas. Nesse cenário, a mistura E apresentou melhor desempenho do que a mistura F nas abordagens *midpoint* e *endpoint*, uma vez que incorporou menos massa de GBP, aditivo e de produto extrudido do que F. Relativamente à comparação entre o cenário 3 e o cenário 1, visou analisar a influência de incorporação de polipropileno virgem (PP) e de polipropileno reciclado (PPR) nas misturas. Nesta comparação, foi observado que as misturas que incorporaram PP reciclado apresentaram melhor desempenho ambiental do que as misturas que incorporaram PP virgem em quase todas as categorias *midpoint* (AG, FO FP, AT, ET, Os, DRF e CA), estas melhorias foram entre 1,7-75,9% de impacto ambiental, salientando-se as categorias AG, FO, FP, ET e DRM com melhorias superiores a 26,47%. De igual modo, em todas as categorias *endpoint* observaram-se melhorias entre 27,3-86% de dano ambiental. Estes resultados provaram que a utilização de PP reciclado apresenta benefícios ambientais face à utilização de material virgem (PP).

A utilização de materiais reciclados (GBP e PPR) na incorporação do perfil face à utilização de materiais virgens (BS e PP) permitem obter reduções significativamente vantajosas em quase todas as categorias de impacto ambiental, essas reduções são entre 8,3-87,7%, especialmente nas categorias AG, DOE, RI, FO, FP, AT, EAD, ET, DRM, DRF e CA, cujas reduções de impacto foram superiores a 43,5% e para as categorias de dano ambiental permite também obter reduções entre 63,9-93,1%.

Tendo em conta estes resultados e interpretações, concluiu-se o GBP apresenta potencial de redução de impacto face à sua alternativa virgem. Concluiu-se também que a melhor mistura, do ponto de vista ambiental, para constituir o perfil protetor para os prumos verticais da extensão metálica rodoviária é uma mistura com as mesmas proporções que a mistura B. Existem possibilidades de reduzir ainda mais os impactos e danos ambientais proporcionados por este produto. Através da análise da fase de produção do principal material contribuidor de impacto/dano, o PP, podem ser identificadas outras oportunidades para atuar nos processos que permitam reduzir o seu impacto/dano. Uma outra possibilidade é a substituição do PP por uma alternativa mais sustentável, como a sua versão reciclada (PPR). Nos resultados foi demonstrado que a adição de qualquer proporção de GBP e PPR provou, de um modo geral, ser mais benéfica ambientalmente do que a mistura B, especialmente a mistura E.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros seria interessante a realização de um estudo de ACV do produto protetor contemplando a sua fase de utilização e a sua fase de fim-de-vida na avaliação do seu ciclo de vida. A análise permitiria averiguar se as proporções mais favoráveis ambientalmente se mantiveriam ou se alteravam.

Além disso, seria, igualmente, interessante estudar a influência da utilização de energias renováveis como fonte de energia na fase de produção do produto final e das matérias-primas, como também estudar a influência das distâncias de transporte e tipo de combustíveis/energia elétrica utilizados/as.

A realização de estudos ACV comparativos entre o perfil protetor e diferentes aplicações de GBP (nomeadamente incineração, pavimentos rodoviários, produtos moldados), também seriam pertinentes para análise de aplicação de GBP mais ambientalmente sustentável.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Amorim da Silva, S. (2011). *DA BORRACHA PROVENIENTE DOS PNEUS USADOS / ECODESIGN UMA NOVA ABORDAGEM NO. 129.*
- ANI - Agência Nacional de Inovação. (n.d.). Retrieved February 21, 2020, from <http://projetos.ani.pt/actions/project?id=C31/2018/38326&search=global&actionbean=actions/project>
- APA. (2017). *Perguntas Frequentes Pneus Usados.* 1–7.
- Aranda Uson, A., Ferreira, G., Zabalza Bribian, I., & Zambrana Vasquez, D. (2012). Study of the environmental performance of end-of-life tyre recycling through a simplified mathematical approach. *Thermal Science, 16*(3), 889–899. <https://doi.org/10.2298/TSCI120212129A>
- Banar, M. (2015). Life cycle assessment of waste tire pyrolysis. *Fresenius Environmental Bulletin, 24*(4), 1215–1226.
- Basel Convention, & UNEP. (2002). BASEL CONVENTION TECHNICAL GUIDELINES ON THE IDENTIFICATION AND MANAGEMENT OF USED TYRES: Basel Convention on the Control of Transboundary Movements on Hazardous Wastes and Their Disposal. In *October* (Issue 10). http://www.basel.int/meetings/sbc/workdoc/old_docs/tech-usedtyres.pdf
- Bressi, S., Santos, J., Giunta, M., Pistonesi, L., & Lo Presti, D. (2018). A comparative life-cycle assessment of asphalt mixtures for railway sub-ballast containing alternative materials. *Resources, Conservation and Recycling, 137*(November 2017), 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.028>
- Bressi, S., Santos, J., Marko, O., & Losa, M. (2019). A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. *International Journal of Pavement Engineering, 0*(0), 1–15. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1623404>
- Cao, R., Leng, Z., Hsu, M. S. C., Yu, H., & Wang, Y. (2017). Integrated sustainability assessment of asphalt rubber pavement based on life cycle analysis. *Pavement Life-Cycle Assessment - Proceedings of the Pavement Life-Cycle Assessment Symposium, 2017*, 199–209. <https://doi.org/10.1201/9781315159324-21>
- Clauzade, C., Osset, P., Hugrel, C., Chappert, A., Durande, M., & Palluau, M. (2010). Life cycle assessment of nine recovery methods for end-of-life tyres. *International Journal of Life Cycle Assessment, 15*(9), 883–892. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0224-z>
- Comissão Europeia. (2015). Fechar o ciclo – plano de ação da UE para a economia

- circular. *Official Journal of the European Union*, 1–24. http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF
- Conselho da União Europeia. (1999). Directiva 1999/31/CE. *Jornal Oficial Das Comunidades Europeias*, 182(10), 1–19.
- Corti, A., & Lombardi, L. (2004). End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA. *Energy*, 29(12-15 SPEC. ISS.), 2089–2108. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.014>
- Decreto-Lei n.º 152-D/2017, 11 de dezembro. (2017). Governo da República. *Diário Da República*, 236(1.ª série), 88–135. https://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Resíduos/FluxosEspecificosResíduos/DL152D_2017_Unilex.pdf
- Djadouni, H., Trouzine, H., Gomes Correia, A., & Miranda, T. F. da S. (2019). Life cycle assessment of retaining wall backfilled with shredded tires. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(3), 581–589. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1475-3>
- Domingos, J. D. (1998). Seminário Inaugural. *Ambiente e Desenvolvimento Sustentável: Perspectivas e Políticas Para o Desenvolvimento Regional*, 1–38.
- ETRMA. (2011). End of life tyres. *End of Life Tyres - a Valuable Resource with Growing Potential*, 1–22. http://www.wastexchange.co.uk/documenti/tyres/ETRMA_ELTS_report_2006.pdf
- Farina, A., Zanetti, M., Santagata, E., Blengini, G., & Lanotte, M. (2014). Life Cycle Assessment of road pavements containing crumb rubber from end-of-life tires. *International Symposium on Pavement Life Cycle Assessment*, 2, 119–132.
- Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>
- Feio, M. I. (2013). *Maria Inês Afonso Feio*. https://run.unl.pt/bitstream/10362/10204/1/Feio_2013.pdf
- Feraldi, R., Cashman, S., Huff, M., & Raahauge, L. (2013). Comparative LCA of treatment options for US scrap tires: Material recycling and tire-derived fuel combustion. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 613–625. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0514-8>
- Ferrão, P., Ribeiro, P., & Silva, P. (2008). A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study. *Waste Management*, 28(3), 604–614. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.033>
- Fiksel, J., Bakshi, B. R., Baral, A., Guerra, E., & Dequervain, B. (2011). Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(1), 19–35. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0289-1>
- Goedkoop, M. et al. (2013). *Introduction to LCA with SimaPro Colophon*. November.

- IPQ. (2006). Gestão ambiental/Avaliação do ciclo de vida/Princípios e enquadramento. *Norma Portuguesa, 2005*, 29.
- IPQ. (2010). *NP EN ISO 14044:2010 - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e linhas de orientação*.
- Johansson, K. (2018). *Life cycle assessment of two end-of-life tyre applications: artificial turfs and asphalt rubber*. 71.
- Keeble, B. R. (1988). The Brundtland Report: "Our Common Future." *Medicine and War*, 4(1), 17–25. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- Kløverpris, N. H., & Schmidt, A. (2009a). Comparative LCA of two options for ELT treatment: recycling vs civil engineering applications. *Development*. http://www.genan.eu/Files/Filer/pdf/LCA_-_Material_recycling_vs._civil_engineering_applications.pdf
- Kløverpris, N. H., & Schmidt, A. (2009b). Comparative LCA of two options for ELT treatment: recycling vs co-incineration in cement kilns. *Development*. http://www.genan.eu/Files/Filer/pdf/LCA_-_Material_recycling_vs._civil_engineering_applications.pdf
- Kurt Reschner. (2008). *Scrap Tire Recycling*.
- Li, W., Wang, Q., Jin, J., & Li, S. (2014). A life cycle assessment case study of ground rubber production from scrap tires. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1833–1842. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0793-3>
- Li, X., Xu, H., Gao, Y., & Tao, Y. (2010). Comparison of end-of-life tire treatment technologies: A Chinese case study. *Waste Management*, 30(11), 2235–2246. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.06.006>
- Maxineasa, S. G., Neocleous, K., Dumitrescu, L., Themistocleous, K., Taranu, N., & Hadjimitsis, D. (2017). *Environmental Lca of Innovative Reuse of All End-of-Life Tyre Components in April*, 19–21.
- Moral, A., Irusta, R., & Division, E. (2004). *Development of a New Road Safety Barrier Coverage manufactured from Used Tyres . A Technical , Economical and Environmental*.
- Moreno Ruiz, E., Valsasina, L., FitzGerald, D., Brunner, F., Symeonidis, A., Bourgault, G., & Wernet, G. (2019). *Documentation of changes implemented in theecoinvent database v3.6*. 0(5), 1–97.
- MUHAMMAD USMAN RAFIQUE, R. (2012). Life Cycle Assessment of Waste Car Tyres at Scandinavian Enviro Systems Master of Science Thesis in Chemical and Biological Engineering Life Cycle Assessment of Waste Car Tyres. *Chalmers University of Technology*.
- Neri, E., Berti, B., Passarini, F., Vassura, I., Giorgini, L., Zattini, G., Tosi, C., & Cavazzoni, M. (2018). Application of LCA methodology in the assessment of a pyrolysis process for tyres recycling. *Environmental Engineering and Management Journal*, 17(10), 2437–2445. <https://doi.org/10.30638/eemj.2018.242>
- Ortíz-Rodríguez, O. O., Ocampo-Duque, W., & Duque-Salazar, L. I. (2017). Environmental impact of end-of-life tires: Life cycle assessment comparison of three scenarios

- from a case study in Valle Del Cauca, Colombia. *Energies*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/en10122117>
- Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. (2008). DIRECTIVA 2008/98/CE de 19 de Novembro de 2008 relativa aos resíduos e que revoga certas directivas. *Jornal Oficial Da União Europeia*, 9, 3–30.
- Pereira, J. (2009). Sustentabilidade: diferentes perspectivas, um objectivo comum. *Economia Global e Gestão*, 14(1), 115–126. http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?pid=S0873-74442009000100008&script=sci_arttext&lng=p#1%5Cnhttp://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S0873-74442009000100008&script=sci_arttext
- Piotrowska, K., Kruszelnicka, W., Bałdowska-Witos, P., Kasner, R., Rudnicki, J., Tomporowski, A., Flizikowski, J., & Opielak, M. (2019). Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method. *Materials*, 12(24), 25. <https://doi.org/10.3390/ma12244177>
- Praticò, F. G., Giunta, M., Mistretta, M., & Gulotta, T. M. (2020). Energy and environmental life cycle assessment of sustainable pavement materials and technologies for urban roads. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2), 15. <https://doi.org/10.3390/su12020704>
- Pré. (2014). *Simapro Database Manual*. 3–48. <http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>
- Puccini, M., Leandri, P., Tasca, A. L., Pistonesi, L., & Losa, M. (2019). Improving the environmental sustainability of low noise pavements: Comparative life cycle assessment of reclaimed asphalt and crumb rubber based warm mix technologies. *Coatings*, 9(5), 17. <https://doi.org/10.3390/coatings9050343>
- República Portuguesa - Ambiente. (2017). Liderar a Transição - Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal: 2017-2020. *Resolução Do Conselho de Ministros n.º 190-A / 2017*, 1–62.
- RIVM. (2017). *ReCiPe 2016 v1.1*. 201. www.rivm.nl/en
- Rodríguez-Alloza, A. M., Malik, A., Lenzen, M., & Gallego, J. (2015). Hybrid input-output life cycle assessment of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 90, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.035>
- Sato, H., & Ogawa, H. (2009). Review on Development of Polypropylene Manufacturing. *Sumitomo Kagaku*, 1–11.
- Silva, P., Campos, S., Mestrado, P., Gestão, E., Minho, A. U., Pela, O., Doutora, E., & Cramez, C. (2006). *Dissertação de Mestrado*. 157.
- Simões, C. L., Simoes, R., Carvalho, J., Pontes, A. J., & Bernardo, C. A. (2013). The quest for a sustainable product: An environmental study of tyre recyclates. *Materials and Design*, 52, 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.051>
- Sun, X., Liu, J., Hong, J., & Lu, B. (2016). Life cycle assessment of Chinese radial passenger vehicle tire. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(12), 1749–1758. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1139-0>

- The Basel Convention. (2010). *Revised technical guidelines on the environmentally sound management of used tyres*. July, 1–56. <http://archive.basel.int/meetings/oewg/oewg7/docs/i09e.pdf>
- US Environmental Protection Agency. (1991). Organic Chemical Process Industry. *AP 42 Compliance of Air Pollutant Emission Factors*, 91, 10–15.
- Valorpneu. (2018). *Componentes e Características de um Pneu*. <https://www.valorpneu.pt/informacao-tecnica/componentes-e-carateristicas-de-um-pneu/>
- Wo, A., Pedro, M., Pereira, M., & Reciclagens, B. I. De. (2014). *Patentes Material compósito de granulado de borracha de pneus usados reciclado numa matriz polimérica*.
- Yu, B., Jiao, L., Ni, F., & Yang, J. (2014). Evaluation of plastic-rubber asphalt: Engineering property and environmental concern. *Construction and Building Materials*, 71, 416–424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.075>