

**Avaliação do Ciclo de Vida de uma estrutura de autocarro fabricada
por Enrolamento Filamentar e Tecnologias RTM**

Inês Castelo Branco Machado

Dissertação do MIEM

Orientadores na FEUP:

Prof. António Torres Marques

Prof. Belmira Neto



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2014

Ao meu Pai

Resumo

A crescente preocupação ambiental tem levado ao desenvolvimento de soluções alternativas na indústria dos transportes. Estas soluções pretendem reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões poluentes associadas, passando pelo desenvolvimento de tipos de motorização alternativos ou pelo desenvolvimento de estruturas mais leves mas que respondam às mesmas exigências estruturais. Neste âmbito, os sistemas compósitos apresentam-se como uma alternativa, permitindo a construção de estruturas mais leves com elevada resistência estrutural e rigidez.

Este estudo tem como principal objetivo a comparação do impacto ambiental associado ao ciclo de vida de duas versões de um dos módulos de carroçarias de autocarro, sendo que uma é fabricada em sistemas compósitos e a outra em alumínio. A carroçaria em sistemas compósitos é uma estrutura do tipo sanduíche em fibra de vidro e resina de poliéster isoftálica não saturada, sendo obtida por enrolamento filamentar a seco e RTM – Moldação por Transferência de Resina. As etapas consideradas na avaliação dos impactos ambientais incluem a extração das matérias-primas e produção dos materiais utilizados nas carroçarias, o fabrico do módulo e a sua utilização durante o ciclo de vida do autocarro.

Para a avaliação dos impactos ambientais é usado o programa SimaPro versão 7.1.8 (PRé-Consultants, 2011). O método de avaliação dos impactos ambientais utilizado é o ReCiPe 2008, sendo o impacto ambiental calculado usando as abordagens *midpoint* e *endpoint*. São apresentados os resultados obtidos para as etapas de Caracterização e Ponderação (sendo aqui apresentado um indicador único agregado englobando todas as categorias de impacto ambiental).

Os resultados obtidos permitem concluir que o módulo da carroçaria em sistemas compósitos apresenta um menor impacto ambiental quando comparado com o módulo da carroçaria em alumínio, tendo-se obtido uma redução do impacto ambiental em 24% no que diz respeito ao indicador único agregado. As categorias de impacto ambiental com maior contribuição para o indicador de impacto agregado são as categorias de Alteração Climática e Formação de Partículas, sendo que na base desta contribuição está a libertação de dióxido de carbono e óxidos de azoto durante a fase de utilização das carroçarias. A fase de Utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental, apresentando uma contribuição superior a 70% para o valor do impacto ambiental global para ambos os módulos. O estudo efetuado permite concluir que, para o sistema estudado (que inclui a extração dos materiais, a produção da carroçaria e a sua utilização), os sistemas compósitos se apresentam como uma alternativa promissora na indústria dos transportes, uma vez que a redução de peso das estruturas permite uma redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, das emissões de gases. Isto deriva do facto de estas emissões serem as principais contribuidoras para o impacto ambiental associado aos veículos em estudo.

Life Cycle Assessment of a bus body manufactured using filament winding and RTM technologies

Abstract

The increasing of environmental concern has led to the development of alternative solutions in the transportation industry. Such solutions aim to reduce the fuel consumption and thus the associated emissions, through the development of alternative engine types or the development of lighter structures that can meet the same structural requirements. In this context, composite materials are presented as an alternative allowing the construction of lighter structures with high structural strength and stiffness.

The main objective of this study is then to compare the environmental impact with respect to the life cycle of two modules of a bus body, one being manufactured with composite materials and the other one in aluminium. The composite module is a sandwich structure of glass fibre and an isophthalic unsaturated polyester resin, and it's manufactured by dry filament winding and RTM – Resin Transfer Molding. The life cycle phases considered in the assessment of the environmental impacts include the extraction of raw materials and production of the materials used in the bus body, the manufacture of the module and its use during the life cycle of the bus.

To the assessment of environmental impacts SimaPro version 7.1.8 (PRE - Consultants, 2011) is used. The method used for the assessment of environmental impacts is the ReCiPe 2008 method, and the environmental impact is calculated through midpoint and endpoint approaches. The results for Characterization and Weighting are presented, in which Weighting is presented in a single aggregated indicator encompassing all categories of environmental impact.

The results indicate that the composite module has a lower environmental impact when compared to the aluminium module, having achieved an environmental impact reduction of 24% with respect to the single indicator unit. The environmental impact categories that have the greatest impact are the categories Climate Change and Particle Matter Formation, being on the basis of this contribution the release of carbon dioxide and nitrogen oxides during the use phase of the vehicle. The use phase is the phase that contributes most to the environmental impact for both modules, with a contribution higher than 70% to the value of the overall environmental impact. The study performed concludes that, for the analysed system (which includes the extraction of materials, production and use of the bus body), the composites are presented as a promising alternative, since the weight reduction of the structure leads to the reduction of fuel consumption and therefore to the reduction of greenhouse gases emissions. This is due to the fact that these emissions are the major contributor to the environmental impact of the vehicles under analysis.

Agradecimentos

Este espaço dedica-se ao agradecimento de todas as pessoas que de alguma forma tiveram um contributo positivo na realização desta dissertação. Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor António Torres Marques pela oportunidade proporcionada e pela colaboração ao longo destes meses. Gostaria também de dedicar um especial agradecimento à Professora Belmira Neto pelo entusiasmo demonstrado no projeto e pela disponibilidade constante.

No INEGI, ao Engenheiro Nuno Moita, por todo o apoio prestado com o *software* utilizado e pelas diversas sugestões propostas e ao Engenheiro Paulo Neves pelo apoio prestado com as simulações.

Na CaetanoBus, S.A., a todo o departamento de Engenharia, em especial ao Engenheiro José Costa e ao Engenheiro Rodrigo Coelho, pelo apoio na integração na empresa e pela disponibilidade e ajuda prestadas.

Ao Tiago, por me mostrar pontos de vista diferentes.

Por fim, à minha Mãe pela paciência e carinho constantes ao longo destes últimos meses. Um sincero Obrigada.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

Índice de Conteúdos	vi
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Índice de Equações	xv
Lista de abreviaturas e simbologia	xvi
1. Introdução	1
1.1 Estrutura e organização da dissertação	1
1.2 Apresentação do projeto no âmbito da empresa CaetanoBus, S.A.	2
1.3 Benefícios da utilização de sistemas compósitos na indústria dos transportes	3
Parte I - Revisão Bibliográfica	
2. Estado da Arte.....	5
2.1 Soluções já existentes de autocarros em sistemas compósitos.....	5
2.1.1 LiteBus - Modular Lightweight Sandwich Bus Concept.....	5
2.1.2 Civitas-Bus.....	5
2.1.3 CompoBus	6
2.2 Avaliação do ciclo de vida de sistemas compósitos.....	7
2.2.1 Análise dos consumos de energia ao longo do ciclo de vida para compósitos reforçados com fibras	10
2.2.2 Comparação entre o desempenho ambiental de produtos compósitos e materiais tradicionais	11
2.2.3 Avaliação do ciclo de vida da fibra de vidro	11
2.2.4 Desempenho ambiental de materiais leves usados em aplicações automóveis.....	12
2.2.5 Avaliação ambiental de métodos de produção alternativos para componentes compósitos de aviões	13
3. Sistemas compósitos	15
3.1 Materiais utilizados.....	15
3.1.1 Fibra de vidro.....	15
3.1.2 Matriz termoendurecível de resina de poliéster não saturada	17
3.2 Opções de fim de vida dos sistemas compósitos.....	19
3.2.1 Reutilização	20
3.2.2 Recuperação	20
3.2.3 Reciclagem	20
3.3 Processos de Fabrico.....	24
3.3.1 Enrolamento filamentar.....	25
3.3.2 RTM – Moldação por Transferência de Resina	29
3.4 Critérios de rotura	32
3.4.1 Critério de Hashin	32
3.5 Estruturas em sanduíche	34
3.5.1 Conceito.....	34
3.5.2 Modos de falha	35
3.6 Ligação a outros elementos, aberturas das janelas e acabamento	37
3.6.1 Métodos de ligação.....	37
3.6.2 Aberturas das janelas	39

3.6.3	Acabamento.....	40
3.7	Inspeção e estratégias de reparação	41
3.7.1	Inspeção não destrutiva.....	41
3.7.2	Estratégias de reparação.....	42
4.	A Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida	44
4.1	Introdução	44
4.2	Metodologia	45
4.2.1	Definição do objetivo e âmbito.....	46
4.2.2	Inventário	46
4.2.3	Avaliação dos impactos ambientais	47
4.2.4	Interpretação.....	48
Parte II - Trabalho Realizado		
5.	Materiais e tecnologias de fabrico.....	49
5.1	Seleção dos materiais.....	49
5.2	Seleção dos processos de fabrico	52
5.3	Abordagem modular.....	53
5.3.1	Descrição dos módulos.....	53
5.3.2	Industrialização e tempos de produção	60
6.	Avaliação do ciclo de vida.....	63
6.1	Objetivos e âmbito da ACV	63
6.2	Inventário do ciclo de vida.....	64
6.2.1	Extração e produção das matérias-primas	65
6.2.2	Fabrico da carroçaria	66
6.2.3	Utilização	70
6.3	Avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida.....	74
7.	Análise de resultados	78
7.1	Resultados da Caracterização de cada módulo.....	78
7.2	Comparação entre o módulo COBUS e FEUPBUS	80
7.2.1	Comparação dos resultados da Caracterização	81
7.2.2	Resultados da Ponderação.....	81
7.2.3	Impacto ambiental associado a cada uma das fases do ciclo de vida consideradas	84
7.2.4	Comparação dos resultados obtidos com os resultados disponíveis na bibliografia	88
7.3	Solução otimizada da carroçaria em sistemas compósitos	89
7.4	Comparação dos resultados com os obtidos anteriormente	94
7.4.1	Resultados da Caracterização.....	96
7.4.2	Resultados da Ponderação.....	97
8.	Conclusões, limitações do trabalho realizado e trabalhos futuros.....	99
Referências e Bibliografia		102
ANEXO A: Lista de componentes		105
Anexo A1:	Lista de componentes do módulo COBUS.....	105
Anexo A2:	Lista de componentes do módulo FEUPBUS.....	107
ANEXO B: Fichas Técnicas		108
Anexo B1:	Ficha técnica Al 6106-T6	108

Anexo B2: Ficha técnica M87 High Temp Mold Release Wax®	109
Anexo B3: Ficha técnica Econostitch®	111
Anexo B4: Ficha técnica MEKP Liquid Hardener®	112
Anexo C: Árvores correspondentes ao ciclo de vida de cada módulo	114
Anexo C1: COBUS	114
Anexo C2: FEUPBUS	115
Anexo D: Fatores de conversão para a agregação das categorias de impacto ambiental <i>Midpoint</i> em indicadores <i>Endpoint</i>	116
Anexo E: Resultados das simulações para o FEUPBUS versão 2	118
Anexo E1: Aceleração vertical de 3g (sem reforço)	118
Anexo E2: Aceleração longitudinal de 0,75g (Com reforço)	120
Anexo E3: Aceleração lateral de 1,25g (Com reforço)	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Emissão de gases provocadores de efeito de estufa, por sector, na UE-27 em 2010 (Agency, 2012).....	3
Figura 2 - Protótipo do LiteBus (Fernandes, 2009).....	5
Figura 3 - Protótipo do Civitas-Bus (FEUP, 2012)	6
Figura 4 - Primeiro modelo do CompoBus desenvolvido pela North American Industries (Hunt, 2009)	6
Figura 5 – Comparação das poupanças de energia do ciclo de vida entre a substituição do aço por compósitos de fibra de vidro e resina de poliéster ou de alumínio por compósitos (Song, 2009).....	10
Figura 6 – Resultados do impacto ambiental para os quatro indicadores de impacto ambiental: Alteração Climática, Recursos, Saúde Humana, Ecossistemas. Os materiais encontram-se identificados no eixo horizontal e cada barra apresenta a contribuição das fases do ciclo de vida consideradas.....	13
Figura 7 - Comparação de diferentes processos de fabrico para as categorias de impacto consideradas, usando o método Impact 2002+ (Witik et al., 2012)	14
Figura 8 - Processo de fabrico da fibra de vidro (adaptado de (Rudd et al., 1997)).....	16
Figura 9 - Produção de matérias-primas derivadas do carvão e do petróleo (adaptado de (NZIC, 1998)).....	18
Figura 10 - Representação esquemática do processo de produção do poliéster (adaptado de (NZIC, 1998)).....	19
Figura 11 - Processos de reciclagem para os compósitos termoendurecíveis (adaptado de (Pickering, 2006)).....	21
Figura 12 - Processo de reciclagem por leito fluidizado (adaptado de (Pickering, 2006))	22
Figura 13 - Processo de pirólise (adaptado de (Pickering, 2006)).....	23
Figura 14 - Processos de fabrico dos sistemas compósitos (adaptado de (Mazumdar, 2002))	24
Figura 15 - Representação do processo de enrolamento filamentar (Fiberglass).....	25
Figura 16 - Padrões de enrolamento: a) Enrolamento helicoidal, b) Enrolamento polar, c) Enrolamento circunferencial (Campbell, 2004)	25
Figura 17 - Máquina de colocação de fibra (lado direito) a construir uma peça complexa e de alto desempenho para um avião (Beckwith, 2008).....	27
Figura 18 - Representação do processo RTM (adaptado de (Song, 2003)).....	29
Figura 19 - Representação do processo SCRIMP (adaptado de (Mazumdar, 2002)).....	31
Figura 20 - Constituição de uma estrutura em sanduíche (Belbute, 2010).....	34
Figura 21 - Custo relativo em função do desempenho relativo para diversos tipos de núcleo (Campbell, 2004).....	35
Figura 22 – Junção de uma peça compósita com uma peça metálica: a) ligação por adesivo, b) ligação por parafuso (adaptado de (Mazumdar, 2002)).....	37
Figura 23 - Técnicas de <i>pinch-off</i> (adaptado de (Rudd et al., 1997))	39

Figura 24 - Representação da aplicação do PIMC	40
Figura 25 – Potenciais falhas em peças compósitas consoante a fase de fabrico e uso (adaptado de (Campbell, 2004))	41
Figura 26 - Representação do ciclo de vida e das entradas e saídas dos materiais e energia associados a um produto composto por sistemas compósitos (adaptado de (Anderson et al., 2004))	44
Figura 27 – Etapas da metodologia de avaliação do ciclo de vida (NP EN ISO 14040:2008)	46
Figura 28 – Exemplo de definição das fronteiras do sistema (Vigon et al., 1994)	47
Figura 29 – Passos obrigatórios e opcionais para a etapa de avaliação dos impactos ambientais (adaptado de (Pennington et al., 2004)).....	48
Figura 30– Rigidez específica (Módulo de Young (GPa)/Densidade (kg/m^3) em função do preço (€/kg)), para os materiais selecionados (CES EduPack)	50
Figura 31 - Resistência específica (Tensão Limite de Elasticidade (MPa)/Densidade (kg/m^3)) em função do preço (€/kg), para os materiais selecionados (CES EduPack)	50
Figura 32 - Emissões de CO ₂ na produção primária (kg/kg) em função do preço (€/kg), para os materiais selecionados (CES EduPack)	52
Figura 33 - Representação simplificada do módulo escolhido para a avaliação do ciclo de vida	53
Figura 34 - Modelo COBUS.....	54
Figura 35 - Principais etapas do processo de produção de alumínio (adaptado de (Hydro, 2013))	55
Figura 36 - Desenho virtual do FEUPBUS (Almeida, 2013).....	57
Figura 37 - Fases do ciclo de vida do módulo das duas carroçarias em estudo	64
Figura 38 - Consumo de combustível (litros) em função do tempo (anos).....	71
Figura 39 - Resultados da etapa de Caracterização para o módulo COBUS para cada categoria de impacto ambiental.....	79
Figura 40 - Resultados da etapa de Caracterização para o módulo FEUPBUS para cada categoria de impacto ambiental	80
Figura 41 – Resultados comparativos da etapa de Caracterização para os dois módulos em estudo.....	81
Figura 42 - Comparação entre o módulo COBUS e FEUPBUS, para as categorias de impacto ambiental <i>midpoint</i> , expresso em pontos (Pt).....	82
Figura 43 - Comparação entre o módulo COBUS e FEUPBUS, para as categorias de impacto ambiental <i>endpoint</i> , expresso em pontos (Pt).....	83
Figura 44 - Comparação entre o COBUS e o FEUPBUS, em pontos (Pt) para cada fase do ciclo de vida considerada para as categorias de impacto ambiental <i>endpoint</i> , expresso em Pontos (Pt).....	84
Figura 45 - Comparação entre a produção de 1 kg de alumínio e 1 kg de resina de poliéster não saturada, para as categorias de impacto ambiental intermédias, expressos em pontos (Pt)	85

Figura 46 – Módulo considerado.....	90
Figura 47 - Representação dos apoios e da aceleração à qual o módulo está sujeito	90
Figura 48 - Propagação do dano das fibras à compressão (HSNFCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g	91
Figura 49 - Propagação do dano das fibras à tração (HSNFTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g.....	91
Figura 50 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g.....	92
Figura 51 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g	92
Figura 52 - Resultados comparativos da etapa de Caracterização para os três módulos em estudo.....	96
Figura 53 - Comparação entre os três módulos em estudo, para as categorias de impacto ambiental <i>endpoint</i> , expresso em pontos (Pt).....	97
Figura 54- Comparação entre os três módulos, em pontos (Pt) para cada fase do ciclo de vida considerada para as categorias de impacto ambiental <i>endpoint</i> , expresso em Pontos (Pt)	98
Figura C 1 – Árvore correspondente ao ciclo de vida do módulo COBUS.....	114
Figura C 2 - Árvore correspondente ao ciclo de vida do módulo FEUPBUS	115
Figura E 1 - Propagação do dano das fibras à compressão (HSNFCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g	118
Figura E 2 - Propagação do dano das fibras à tração (HSNFTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g	118
Figura E 3 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g	119
Figura E 4 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g	119
Figura E 5 - Propagação do dano das fibras à compressão (HSNFCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g...	120
Figura E 6 - Propagação do dano das fibras à tração (HSNFTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g	120
Figura E 7 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g...	121
Figura E 8 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g	121
Figura E 9 - Propagação do dano nas fibras à tração (HSNFTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g.....	122

Figura E 10 - Propagação do dano nas fibras à compressão (HSNFCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g 122

Figura E 11 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g 123

Figura E 12 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g 123

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos de ACV aplicados aos materiais em estudo.....	8
Tabela 2 – Resultados obtidos no estudo de ACV para a produção de fibra de vidro, numa abordagem berço-portão (GlassFibreEurope, 2012). Os resultados reportam à produção de 1 kg de fibra de vidro.....	12
Tabela 3 - Funções do reforço e da matriz em sistemas compósitos (adaptado de (Mazumdar 2002))	15
Tabela 4 - Propriedades das fibras de vidro do tipo E, S e R (Marques, 2013)	16
Tabela 5- Propriedades das resinas termoendurecíveis (Marques, 2013)	17
Tabela 6 - Vantagens e desvantagens do enrolamento filamentar (adaptado de (Mazumdar, 2002))	26
Tabela 7 – Comparação entre o processo de enrolamento filamentar e o de colocação de fibra (adaptado de (Beckwith, 2008))	28
Tabela 8 - Vantagens e desvantagens do processo RTM (adaptado de (Mazumdar, 2002)) ...	30
Tabela 9 - Modos de falha das estruturas sanduíche (adaptado de (Broughton, 2002)).....	36
Tabela 10 - Vantagens e desvantagens da união por adesivos (adaptado de (Mazumdar, 2002))	38
Tabela 11 – Vantagens e desvantagens das juntas mecânicas (adaptado de (Mazumdar, 2002))	39
Tabela 12 - Rigidez específica, resistência específica e preço (€/kg) da fibra de vidro e da fibra de carbono (GrantaDesign, 2013)	51
Tabela 13 - Informações disponibilizadas sobre o modelo COBUS	54
Tabela 14 - Composição química (%) do alumínio 6106.....	55
Tabela 15 - Propriedades mecânicas do alumínio 6106	55
Tabela 16 – Consumo de gás natural, gasóleo e de energia elétrica para o módulo COBUS para o seu ciclo de produção, em 2013.....	56
Tabela 17 – Propriedades gerais do laminado utilizado (Almeida, 2013).....	57
Tabela 18 - Propriedades mecânicas do laminado utilizado (Almeida, 2013)	58
Tabela 19 - Materiais não recuperáveis utilizados no fabrico do FEUPBUS	59
Tabela 20 - Dimensões das carroçarias e dos módulos do COBUS e do FEUPBUS, bem como as respetivas massas	60
Tabela 21 – Tarefas do Posto 1 e Posto 2 do COBUS, número de horas dispendidas em cada tarefa e trabalhadores afetos a cada posto	61
Tabela 22 – Alteração dos Postos 1 e 2 para a montagem da carroçaria em sistemas compósitos.....	62
Tabela 23 – Materiais usados e massa para cada módulo	63

Tabela 24 - Bases de dados que formam o inventário da fase de extração e produção das matérias-primas para o FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m).....	65
Tabela 25 – Bases de dados que formam o inventário da fase de extração e produção das matérias-primas para o FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m).....	66
Tabela 26 - Bases de dados que formam o inventário da fase de fabrico do COBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m).....	67
Tabela 27 - Bases de dados que formam o inventário da fase de fabrico do FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m).....	69
Tabela 28 – Consumo de combustível (litros) do módulo COBUS e do módulo FEUPBUS para 1, 5 e 15 anos de vida, em função da distância em quilómetros percorridos.....	71
Tabela 29 – Fatores de emissão para a combustão de <i>diesel</i> em veículos pesados (EMEP/EEA 2009).....	72
Tabela 30 - Inventário da fase de utilização do COBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m).....	73
Tabela 31 - Inventário da fase de utilização do FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m).....	74
Tabela 32 – Categorias de impacto ambiental consideradas no método ReCiPe 2008, nas abordagens <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> (Goedkoop et al. 2013).....	76
Tabela 33 - Contribuição das fases do ciclo de vida para as categorias de impacto ambiental, expresso em Pontos.....	87
Tabela 34 - Valores para o início de propagação de dano considerados (Almeida, 2013).....	89
Tabela 35 – Valores máximos obtidos para os critérios de propagação de dano de Hashin, para as simulações efetuadas (FEUPBUS versão 2).....	93
Tabela 36 – Alterações efetuadas ao inventário do ciclo de vida do FEUPBUS.....	95
Tabela A 1 – Lista de componentes do módulo COBUS.....	105
Tabela A 2 – Lista de componentes do módulo FEUPBUS.....	107
Tabela D 1 – Fatores de conversão para a agregação das categorias de impacto ambiental <i>midpoint</i> em indicadores <i>endpoint</i> (Goedkoop et al. 2013).....	116
Tabela D 2 - Fatores de conversão para a agregação da categoria de impacto ambiental Depleção da Camada de Ozono em indicadores <i>endpoint</i> (Goedkoop et al. 2013).....	117

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Falha das fibras por tração (Hashin, 1980).....	33
Equação 2 – Falha das fibras por compressão (Hashin, 1980).....	33
Equação 3 – Falha da matriz por tração (Hashin, 1980)	33
Equação 4 – Falha da matriz por compressão (Hashin, 1980)	33
Equação 5 – Consumo de combustível do módulo de referência – COBUS (Subic, 2006).....	70
Equação 6 – Consumo de combustível do módulo alternativo – FEUPBUS (Subic, 2006)	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIA

Abreviaturas

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
HSNFTCRT	Critério de Hashin de iniciação de dano nas fibras à tração (“ <i>Hashin’s fiber tensile damage initiation criterion</i> ”)
HSNFCCRT	Critério de Hashin de iniciação de dano nas fibras à compressão (“ <i>Hashin’s fiber compressive damage initiation criterion</i> ”)
HSNMTCRT	Critério de Hashin de iniciação de dano na matriz à tração (“ <i>Hashin’s matrix tensile damage initiation criterion</i> ”)
HSNMCCRT	Critério de Hashin de iniciação de dano na matriz à compressão (“ <i>Hashin’s matrix compressive damage initiation criterion</i> ”)
ISO	International Organization for Standardization
OOA	Fora-de-autoclave (“ <i>Out-of-autoclave</i> ”)
PIB	Produto Interno Bruto
PIMC	Revestimentos a pó em molde (“ <i>Powder in-mould coatings</i> ”)
PVC	Policloreto de Vinilo
RTM	Moldação por Transferência de Resina (“ <i>Resin Transfer Molding</i> ”)
SCRIMP	Processo de moldação de compósitos por infusão de resina de Seemann (“ <i>Seemann Composite Resin Infusion Molding</i> ”)
SRIM	Moldação por Injecção de Reação Estrutural (“ <i>Structural Reaction Injection Molding</i> ”)
UE-27	União Europeia com 27 Estados-Membros
VARTM	Moldação por Transferência de Resina assistida por vácuo (“ <i>Vacuum-assisted Resin Transfer Molding</i> ”)

Simbologia

ρ	Peso específico (kg/m^3)
σ_e	Tensão Limite de Elasticidade (MPa)
14 DCB	1,4-diclorobenzeno
b (a) P	Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(a) pireno
b (b) F	Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes –

	benzo(b) fluoranteno
b (k) F	Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(k) fluoranteno
c	Valor do Redução do Consumo de Combustível
CFC-11	Tricloromonofluormetano
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
E	Módulo de Young (GPa)
G	Módulo de Corte (GPa)
g	Aceleração da gravidade (9,8 m/s ²)
g eq	gramas equivalentes
kg_{ep}	quilograma equivalente de petróleo
ID (1,2,3-cd) P	Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – indeno(1,2,3-cd) pireno
NMVOC	Compostos orgânicos voláteis não-metânicos
N₂O	Óxido de Azoto
NH₃	Amónia
NO_x	Óxidos de Nitrogénio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PM₁₀	Partículas em suspensão com diâmetro inferior a 10 µm
SO₂	Dióxido de Enxofre
S	Tensão de corte (MPa)
U235	Urânio-235
v	Coefficiente de Poisson
X_t	Tensão de cedência à tração na direção longitudinal (MPa)
X_c	Tensão de cedência à compressão na direção longitudinal (MPa)
Y_t	Tensão de cedência à tração na direção transversal (MPa)
Y_c	Tensão de cedência à compressão na direção transversal (MPa)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Estrutura e organização da dissertação

Na indústria dos autocarros, as estruturas mais exigentes são feitas em aço e alumínio. No entanto, com o crescimento cada vez maior das preocupações ambientais, há a necessidade de explorar materiais que conduzam a estruturas mais leves mas que possam responder às mesmas exigências estruturais. Para se tirar o melhor partido destas estruturas é necessário não só selecionar os materiais mas estabelecer também quais os processos de fabrico a utilizar, de modo a otimizar o desempenho da estrutura e diminuir o seu impacto ambiental. Do ponto de vista ambiental, uma das metodologias mais adequadas à avaliação do impacto ambiental associado a produtos e serviços é a metodologia de avaliação do ciclo de vida, uma vez que permite avaliar o impacto ambiental das várias etapas associadas ao ciclo de vida, ou seja, desde o seu início até ao seu fim de vida.

A presente dissertação avalia assim o ciclo de vida de uma estrutura sanduíche utilizando sistemas compósitos, mais especificamente fibra de vidro e resina de poliéster isoftálica não saturada, para a construção de uma carroçaria de autocarro através do processo de enrolamento filamentar e RTM, e a respetiva comparação com uma carroçaria tradicional. Esta dissertação encontra-se dividida em 2 partes, sendo que uma delas inclui uma revisão bibliográfica e a outra o trabalho realizado, e tem ao todo 8 Capítulos.

No Capítulo 1 é feita a introdução da dissertação e de que modo esta está organizada, sendo apresentada a integração deste projeto na empresa CaetanoBus, S.A. e sendo também referidos os benefícios associados à utilização de sistemas compósitos na indústria dos transportes.

A Parte I engloba os Capítulos 2, 3 e 4 e dedica-se à revisão bibliográfica, abordando os temas considerados fundamentais para a realização desta dissertação, nomeadamente: o estado de arte referente a soluções de autocarros já existentes em sistemas compósitos bem como uma revisão de estudos que focam avaliações do ciclo de vida dos sistemas compósitos em estudo; a apresentação dos sistemas compósitos, opções de fim de vida, processos de fabrico utilizados, critérios de rotura em sistemas compósitos de matriz polimérica e estruturas sanduíche. Por fim, é efetuada uma apresentação da metodologia de avaliação do ciclo de vida. São ainda referidas as opções para se efetuar a ligação da carroçaria a outros elementos e quais as estratégias da manutenção e reparação que podem ser utilizadas.

A Parte II inclui os Capítulos 5, 6, 7 e 8 e descreve como a metodologia de avaliação do ciclo de vida foi aplicada a uma carroçaria de autocarro construída em sistemas compósitos e a uma carroçaria em alumínio. O Capítulo 5 descreve as carroçarias que são objeto de estudo, descrevendo os seus materiais e processos de fabrico e fazendo uma abordagem à sua modularização. O Capítulo 6 descreve a modelização do sistema em estudo tendo em conta o programa informático a utilizar (SimaPro versão 7.1.8), enquanto no Capítulo 7 se apresentam e discutem os resultados obtidos para as diferentes categorias de impacto ambiental e para as várias etapas do ciclo de vida consideradas. Este Capítulo inclui ainda uma otimização estrutural da carroçaria em sistemas compósitos, que foi efetuada recorrendo-se ao *software* Abaqus/CAE versão 6.12. Apresentam-se os resultados comparativos entre a carroçaria compósita otimizada, a carroçaria compósita original e a carroçaria em alumínio.

Por fim, o Capítulo 8 apresenta as principais conclusões obtidas, bem como as limitações associadas a este trabalho e apresenta sugestões de trabalhos futuros.

A informação usada na avaliação do ciclo de vida foi fornecida pela empresa CaetanoBus, S.A., no que diz respeito à carroçaria em alumínio. No que diz respeito à carroçaria em sistemas compósitos, a informação foi recolhida num estudo prévio efetuado por Almeida (2013), que teve como objetivo a conceção de uma carroçaria para autocarro em sistemas compósitos através da técnica de enrolamento filamentar a seco e RTM. Ao longo da dissertação este autocarro será designado por FEUPBUS. A restante informação necessária à avaliação do ciclo de vida foi recolhida na bibliografia disponível e em bases de dados. Para a avaliação dos impactos ambientais é usado o programa SimaPro versão 7.1.8 (PRé-Consultants, 2011), sendo usada a metodologia de avaliação de impactos ReCiPe 2008.

1.2 Apresentação do projeto no âmbito da empresa CaetanoBus, S.A.

A CaetanoBus, S.A. é uma empresa que pertence ao grupo Salvador Caetano e produz carroçarias de autocarro montadas em chassis de várias marcas e com diferentes especificações destinadas ao serviço de Turismo, transporte Inter-urbano e serviço de Aeroporto. As suas origens remontam a 1946, ano em que iniciou atividade utilizando madeira como matéria-prima na construção das carroçarias, tendo atualmente sede em Gaia. Destaca-se ainda a data de 1955, ano em que se iniciou a técnica de construção de carroçarias totalmente metálicas. Desde então a empresa tem apostado na melhoria contínua da produção e numa eficiente utilização de recursos, tendo inclusive lançado o “Programa Empresa Verde”, em 1997, para sensibilizar os seus colaboradores para problemas de foro ambiental.

A par com a consciência ambiental surge a tecnologia e inovação, sendo que o avanço tecnológico é fundamental para tornar uma empresa inovadora e competitiva no mercado em que se encontra. Assim, a presente dissertação enquadra-se no interesse da empresa em estudar o desenvolvimento de novos produtos, materiais e processos, pretendendo-se estudar a viabilidade da construção uma carroçaria totalmente compósita, sendo a avaliação do ciclo de vida uma abordagem de apoio à decisão. Este estudo deverá ser complementado com uma avaliação dos custos do ciclo de vida, uma metodologia de carácter económico e que contribui para seleccionar, de entre as alternativas analisadas, a mais eficiente em termos de custos e de utilização de recursos.

A carroçaria base que será estudada é a do modelo COBUS 3000, um autocarro de transporte de passageiros para a utilização em aeroportos, sendo assim efetuada a avaliação do ciclo de vida sobre um módulo desta carroçaria e de uma equivalente em sistemas compósitos.

1.3 Benefícios da utilização de sistemas compósitos na indústria dos transportes

O desenvolvimento sustentável e a proteção ambiental são preocupações cada vez mais importantes na indústria, com ênfase na **redução de emissão de gases**. Isto adquire especial importância na indústria dos transportes, uma vez que esta é a terceira maior contribuidora para a emissão de gases causadores de efeito de estufa na União Europeia, como se verifica na Figura 1.

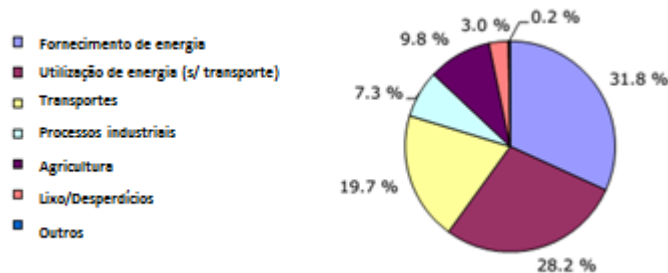


Figura 1 - Emissão de gases provocadores de efeito de estufa, por sector, na UE-27 em 2010
(Agency, 2012)

Atualmente, a indústria dos transportes representa cerca de 5 % do Produto Interno Bruto (PIB) Europeu, realçando assim a importância deste setor para a economia Europeia. O objetivo da política de transportes levada a cabo pela UE pretende promover uma mobilidade que seja eficiente, segura e ambientalmente amigável. As soluções passam por métodos de transportes que sejam eficientemente energéticos e que reduzam as emissões de gases, passando pelo desenvolvimento de motores híbridos e elétricos ou o desenvolvimento de soluções de transporte eficientes e alternativas.

Por fim, a diretiva 2000/53/CE do Parlamento Europeu para veículos em fim de vida do Parlamento Europeu tem como objetivo estabelecer normas para a recuperação dos materiais de veículos em fim de vida, estabelecendo como meta um aumento no mínimo de 95% no que diz respeito à valorização dos veículos em fim de vida e de 85% no que diz respeito à reciclagem, até ao ano de 2015. Pretende-se assim que sejam aplicadas medidas preventivas desde a fase de projeto dos veículos, com o fim de **reduzir o uso de substâncias perigosas** que possam ser libertadas para o ambiente, facilitar a **reciclagem**, e evitar a necessidade de eliminação de resíduos perigosos (Halliwell, 2006).

O uso de sistemas compósitos neste setor apresenta-se assim como uma boa alternativa, permitindo uma **redução do peso dos veículos** e, conseqüentemente, do consumo de energia. Estudos prévios afirmam que a utilização de polímeros reforçados com fibra de vidro poderá resultar numa redução de 20 a 30% no peso dos veículos (Das, 2001). Para além disso, os processos de fabrico inerentes aos sistemas compósitos eliminam a necessidade de ligações entre elementos associadas às estruturas em aço e alumínio, uma vez que estes processos permitem uma **maior integração de componentes**. Assim sendo, é possível **diminuir o tempo associado à montagem** do autocarro e promover uma **redução dos custos** de produção e de manutenção. Por fim, pretende-se que a **boa resistência à corrosão** dos sistemas compósitos leve a uma diminuição dos custos e tempos de manutenção geralmente necessários nas estruturas em aço.

Resumidamente, as vantagens da utilização de sistemas compósitos no setor dos transportes são:

- Redução do peso do veículo;
- Redução da emissão de gases;
- Possibilidade de maior integração de componentes;
- Resistência específica e rigidez específica superiores;
- Redução do tempo de ciclo de produção;
- Minimização dos custos de manutenção.

PARTE I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Soluções já existentes de autocarros em sistemas compósitos

A secção seguinte apresenta soluções já existentes de autocarros construídos em sistemas compósitos, sendo que dois deles se encontram atualmente em circulação, o CompoBus e o Civitas. Apesar das vantagens do fabrico de carroçarias em sistemas compósitos serem comprovadas, os custos associados ao seu fabrico são elevados, o que pode comprometer o interesse das empresas no desenvolvimento de novas soluções. Dos projetos apresentados, todos concluem que o uso de sistemas compósitos origina carroçarias mais leves, mas nenhuma das análises avalia aos impactos ambientais do ciclo de vida do produto.

2.1.1 LiteBus - Modular Lightweight Sandwich Bus Concept

LiteBus foi um projeto financiado pela União Europeia, que teve como finalidade a construção de um autocarro urbano com um peso e custos de produção reduzidos face a um autocarro convencional. Pretendeu-se o desenvolvimento de uma tecnologia inovadora para a construção de carroçarias de autocarros utilizando painéis portantes, em sanduíche multimaterial. Estes painéis têm que satisfazer requisitos rigorosos, tais como: elevados desempenhos estáticos e dinâmicos, elevada rigidez à flexão e à torção, acústica adequada, segurança passiva e ativa, danos reduzidos nos peões em caso de acidente, resistência ao fogo, resistência à corrosão, fácil reparação e tempo de montagem reduzido (Fernandes, 2009).



Figura 2 - Protótipo do LiteBus (Fernandes, 2009)

2.1.2 Civitas-Bus

O Civitas-Bus inseriu-se dentro do projeto CIVITAS ELAN e teve como principal objetivo a construção de um autocarro de baixo peso, capaz de permitir a diminuição dos consumos de combustível e a conseqüente diminuição das emissões gasosas poluentes para a atmosfera.



Figura 3 - Protótipo do Civitas-Bus (FEUP, 2012)

A carroçaria deste autocarro é feita em sistemas compósitos, do tipo sanduíche, constituída por resina reforçada com fibra de vidro e núcleo de espuma de Policloreto de Vinilo (PVC). A sua construção foi feita por infusão a vácuo, recorrendo a moldes do tipo aberto para laminação manual, tendo-se conseguido obter uma redução de cerca de 20% do peso da carroçaria (FEUP, 2012).

2.1.3 CompoBus

O CompoBus é um autocarro desenvolvido pela empresa North American Bus Industries, em que a sua carroçaria é uma única estrutura do tipo sanduíche, composta por fibras de vidro e resina de viniliéster. Os resultados obtidos foram uma redução do peso total da carroçaria, aumento de 16% da capacidade de passageiros e um aumento de 50% da vida útil do autocarro em relação a um autocarro convencional com carroçaria em aço. Para além disso, o CompoBus apresenta uma excelente resistência à corrosão (Hunt, 2009).



Figura 4 - Primeiro modelo do CompoBus desenvolvido pela North American Industries (Hunt, 2009)

2.2 Avaliação do ciclo de vida de sistemas compósitos

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), na literatura inglesa designada por LCA (“*Life Cycle Assessment*”), é uma ferramenta que tem como objetivo avaliar os potenciais impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto ou serviço. Nesta secção apresentam-se alguns estudos que aplicam a ACV a produtos fabricados usando alguns dos materiais em estudo, nomeadamente a fibra de vidro e a resina de poliéster não saturada. É feita ainda referência a um estudo adicional que, apesar de não se focar nos materiais em estudo, foca um estudo de ACV de processos de fabrico que serão de interesse para esta dissertação, nomeadamente os processos designados como fora de autoclave. A Tabela 1 apresenta um resumo desses estudos.

Tabela 1 - Estudos de ACV aplicados aos materiais em estudo

ESTUDO	Song <i>et al.</i> (2009)	Simões <i>et al.</i> (2012)	GlassFibreEurope (2012)
Objetivos	Estimar o consumo de energia ao longo do ciclo de vida de compósitos pultrudidos utilizados em camiões e autocarros	Identificar qual a melhor opção do ponto de vista ambiental para uma coluna de iluminação	Obter informação relativa aos impactos ambientais da produção de fibra de vidro
Materiais	Fibra de vidro e resina de poliéster não saturada	Fibra de vidro e resina de poliéster não saturada	Fibra de vidro
Local de produção	Não referido	Portugal	Europa
Unidade funcional	1kg de compósitos pultrudidos	Uma coluna de iluminação de 8 metros de altura e uma vida útil de 30 anos	Produção de 1kg de filamentos contínuos de fibra de vidro
Abordagem	Berço-túmulo (“ <i>cradle-to-grave</i> ”)	Berço-túmulo (“ <i>cradle-to-grave</i> ”)	Berço-portão (“ <i>cradle-to-gate</i> ”)
Fases do ciclo de vida consideradas	Produção das matérias-primas; fabrico do produto; utilização; fim de vida	Produção das matérias-primas; fabrico do produto; instalação do produto; utilização e manutenção; desmantelamento; fim de vida; transportes intermédios	Extração e produção das matérias-primas; transporte das matérias-primas; fabrico da fibra de vidro; processos secundários
Método usado para a avaliação de impacto ambiental	Não usado	Eco-Indicador 99, CML 2	IPCC 2007; CML-IA
Etapas da AICV consideradas	Não avaliadas	Classificação, Caracterização e Normalização	Não referido
Categorias de impacto ambiental	Não avaliadas	Depleção de recursos abióticos; alterações climáticas; depleção da camada de ozono; toxicidade humana; ecotoxicidade; acidificação; eutrofização; combustíveis fósseis; inalação de substâncias orgânicas/inorgânicas; radiação; uso de terra; carcinogéneos	Emissões de gases; acidificação; formação de ozono; eutrofização da água; depleção de recursos abióticos
Fases/pontos críticos	Utilização do produto	Produção da fibra de vidro	Produção da fibra de vidro
Conclusões/categorias com maior impacto	A utilização de sistemas compósitos em camiões e autocarros leva a uma poupança de energia quando comparada com o aço, mas o mesmo não se verifica em relação ao alumínio	A coluna feita em aço apresenta o pior desempenho do ponto de vista ambiental; a coluna em fibra de vidro apresenta-se como a melhor opção, devido ao seu tempo de vida útil e sem necessidade de manutenção, ainda que a produção da fibra de vidro seja um processo muito intensivo do ponto de vista energético	61% da energia é gasta na fusão do vidro e 26% é gasta em processos secundários; a fase de produção do vidro é a que tem maior impacto em todas as categorias de impacto ambiental, exceto na eutrofização da água

Tabela 1 - Estudos de ACV aplicados aos materiais em estudo (cont.)

ESTUDO	Witik <i>et al.</i> (2011)	Witik <i>et al.</i> (2012)
Objetivos	Comparar materiais leves (vários compósitos e o magnésio) para um componente automóvel em termos de custos e desempenho ambiental	Quantificar e avaliar as diferenças económicas e ambientais entre o autoclave e processos fora-de-autoclave na produção de um painel de 400x400x4 mm
Materiais	Fibra de vidro e resina de poliéster não saturada (“ <i>sheet moulding compound</i> ”)	Fibra de carbono e resina de epóxico
Local de produção	Europa Ocidental	Europa Ocidental
Unidade funcional	Um anteparo de veículo com uma vida útil de 200 000km	Um painel de 400x400x4 mm em compósito reforçado com fibra de carbono
Abordagem	Berço-túmulo (“ <i>cradle-to-grave</i> ”)	Berço-portão (“ <i>cradle-to-gate</i> ”)
Fases do ciclo de vida consideradas	Extração e produção das matérias-primas; fabrico do produto; utilização; fim de vida	Extração e produção das matérias-primas; transportes intermédios; produção e fim de vida dos materiais não recuperáveis; processos secundários
Método usado para a avaliação de impacto ambiental	Impact 2002+	Impact 2002+
Etapas da AICV consideradas	Não referido	Não referido
Categorias de impacto ambiental	Alterações climáticas; recursos; qualidade do ecossistema; saúde humana	Alterações climáticas; recursos; qualidade do ecossistema; saúde humana
Fases/pontos críticos	Utilização do produto	Produção da fibra de carbono
Conclusões/categorias com maior impacto	O composto de moldação de fibra de vidro com resina de poliéster não saturada apresenta-se como a melhor alternativa, pois ainda que não atinja o menor peso possível quando em comparação com outros materiais leves, tais como compósitos reforçados com fibra de carbono ou o magnésio, são os que apresentam o menor valor de impacto ambiental para as categorias consideradas	O processo de infusão de resina apresentou o melhor desempenho ambiental bem como a maior redução de custos quando comparado com o autoclave

2.2.1 Análise dos consumos de energia ao longo do ciclo de vida para compósitos reforçados com fibras

O estudo de Song *et al.* (2009) avalia os consumos energéticos ao longo do ciclo de vida de compósitos reforçados com fibras, abordando as quatro fases de vida do produto: produção dos materiais, fabrico do produto, utilização e fim de vida. O produto em estudo é obtido pelo processo de pultrusão e tem como finalidade uma aplicação automóvel (em camiões e autocarros), sendo que o material utilizado é a fibra de vidro e resina de poliéster não saturada. A Figura 5 identifica as poupanças de energia ao longo do ciclo de vida (fabrico, utilização e fim de vida) de um autocarro, quando os seus componentes em aço são substituídos alternativamente pelo compósito referido ou por alumínio.

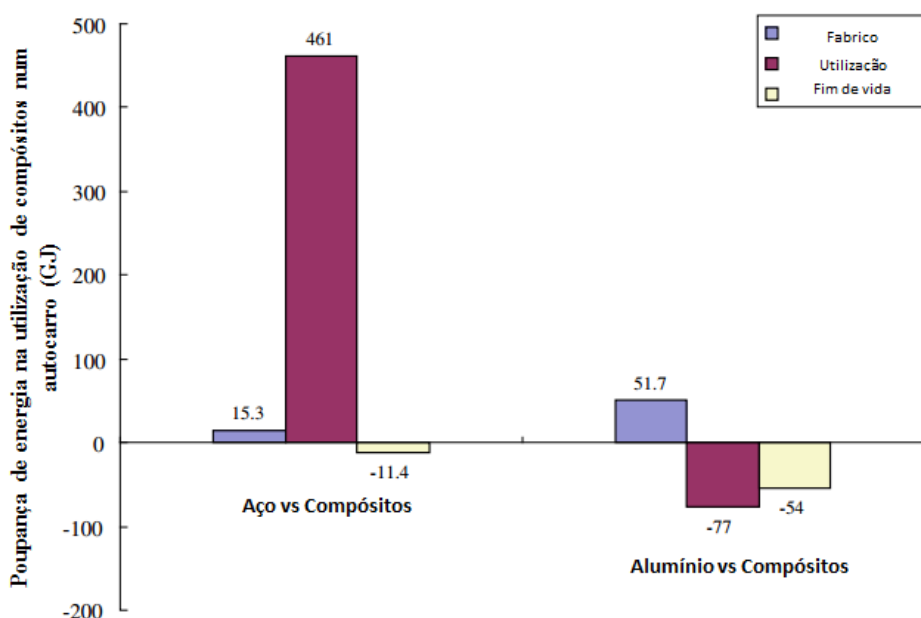


Figura 5 – Comparação das poupanças de energia do ciclo de vida entre a substituição do aço por compósitos de fibra de vidro e resina de poliéster ou de alumínio por compósitos (Song, 2009)

O mesmo estudo conclui que a maior redução do consumo de energia é conseguida na fase de utilização do produto e que a estrutura em compósitos possui um melhor desempenho ambiental quando comparada com a estrutura em aço. Por outro lado, a utilização de alumínio possui vantagens em termos ambientais. Apesar de o seu fabrico necessitar de mais energia, a fase de fim de vida apresenta uma grande contribuição para as poupanças de energia, compensando assim os gastos energéticos associados ao fabrico. Esta conclusão tem como base o fato de o estudo assumir que o alumínio seria 100% reciclado, enquanto o compósito na fase de fim de vida seria depositado em aterro.

2.2.2 Comparação entre o desempenho ambiental de produtos compósitos e materiais tradicionais

O estudo de Simões *et al.* (2012) avaliou o desempenho ambiental de vários materiais através de uma avaliação do ciclo de vida, com o objetivo de identificar qual a melhor opção do ponto de vista ambiental para os materiais usados numa coluna de iluminação. Os materiais estudados incluem compósitos reforçados com fibra de vidro, o aço e o alumínio. Relativamente ao compósito reforçado com fibra de vidro, este é constituído por resina de poliéster não saturada, fibra de vidro do tipo E, um pigmento cinzento e é obtido por infusão a vácuo.

A coluna em aço é a que apresenta um pior desempenho ambiental, apresentando o maior impacto ambiental em todas as categorias exceto nas categorias Carcinógenos, Alteração Climática, Radiação, Uso de solo e Minerais. A coluna em sistemas compósitos apresenta o maior impacto ambiental apenas na categoria Alteração Climática.

Os autores do estudo atribuem particular importância aos impactos associados à categoria de impacto ambiental Combustíveis Fósseis, devido à importância destes na indústria dos plásticos. Verifica-se que a coluna em aço é a que apresenta um maior impacto ambiental nesta categoria, ainda que o alumínio e o compósito sejam produzidos através de processos mais intensivos do ponto de vista energético que o aço. Relativamente ao alumínio, isto deve-se à sua opção de fim de vida (reciclagem do alumínio), que compensa quase 80% do seu impacto ambiental. Quanto ao compósito de fibra de vidro e resina de poliéster não saturada, este apresenta um melhor desempenho ambiental relativamente ao aço independentemente de se considerar ou não o seu fim de vida, uma vez que a quantidade de matéria-prima necessária para construir uma coluna em sistemas compósitos é bastante menor que a necessária para uma coluna equivalente em aço.

2.2.3 Avaliação do ciclo de vida da fibra de vidro

A empresa GlassFibreEurope, responsável por 95% da produção de fibra de vidro na Europa, disponibiliza um estudo que foca a avaliação do ciclo da fibra de vidro. Os resultados indicam que o maior consumo de energia, utilização de recursos não renováveis e emissões de gases de efeito de estufa provêm da fase de fusão do vidro, independentemente da finalidade/aplicação das fibras. Por outro lado, os processos que sucedem a fundição (dimensionamento, enrolamento, corte), também denominados de processos secundários, desempenham um papel limitado na avaliação do ciclo de vida.

A mesma análise indica ainda que, para a produção de 1kg de filamentos contínuos de fibra de vidro são necessários entre 27,3 e 29,0 MJ de energia primária, sendo que 61% desta energia é gasta no processo de fusão do vidro (GlassFibreEurope, 2012).

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para as diferentes categorias de impacto ambiental nesta ACV, sendo que estes valores dependem se a fibra se apresenta como fios cortados ou em forma de bobina (“*roving*”).

Tabela 2 – Resultados obtidos no estudo de ACV para a produção de fibra de vidro, numa abordagem berço-portão (GlassFibreEurope, 2012). Os resultados reportam à produção de 1 kg de fibra de vidro

Indicador de impacto ambiental	Fios cortados secos	Bobina (“roving”)
Energia primária total (MJ)	29,0	27,3
Depleção de recursos naturais (g eq Sb)	10,9	8,6
Consumo de água (litros)	18,7	19,6
Eutrofização da água (mg eq PO ₄)	1187	263
Alteração climática (kg eq CO ₂)	1,9	1,3
Formação de ozono troposférico (g eq etileno)	0,4	0,2
Acidificação (g eq SO ₂)	6	4,5

2.2.4 Desempenho ambiental de materiais leves usados em aplicações automóveis

O estudo de Witik *et al.* (2011) foca uma avaliação do desempenho ambiental de vários materiais (com ênfase nos sistemas compósitos) para um anteparo de um automóvel, tendo como material de referência o aço. Para além deste, os outros materiais estudados foram o magnésio, matriz termoplástica reforçada com fibra de vidro (GMT - “*glass mat thermoplastic*”), composto de moldação de fibra de vidro com resina de poliéster não saturada (SMC - “*sheet moulding compound*”)¹ e dois compósitos obtidos pelo processo SRIM – Structural Reaction Injection Molding - um com fibra de vidro e outro com fibra de carbono, ambos com uma resina de poliuretano.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos. Os resultados da avaliação do ciclo de vida são expressos em quatro indicadores de impacto ambiental: Alteração Climática, Recursos, Qualidade dos Ecossistemas e Saúde Humana. Os resultados indicam que a fase de utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental, tendo-se verificado uma redução do impacto ambiental associado esta fase nos produtos compósitos. Por outro lado, verificou-se um maior contributo para o impacto ambiental da fase de extração e produção das matérias-primas nos sistemas compósitos, quando comparados com o aço. A única exceção foi o composto de moldação de fibra de vidro com resina de poliéster não saturada (SMC). Este foi também o material que, por comparação, apresentou um menor impacto ambiental para os quatro indicadores de impacto ambiental considerados.

¹ A designação SMC refere-se a um composto constituído por fibras e resina (poliéster ou viniléster) envolvidas por folhas de polietileno (Moura, 2005)

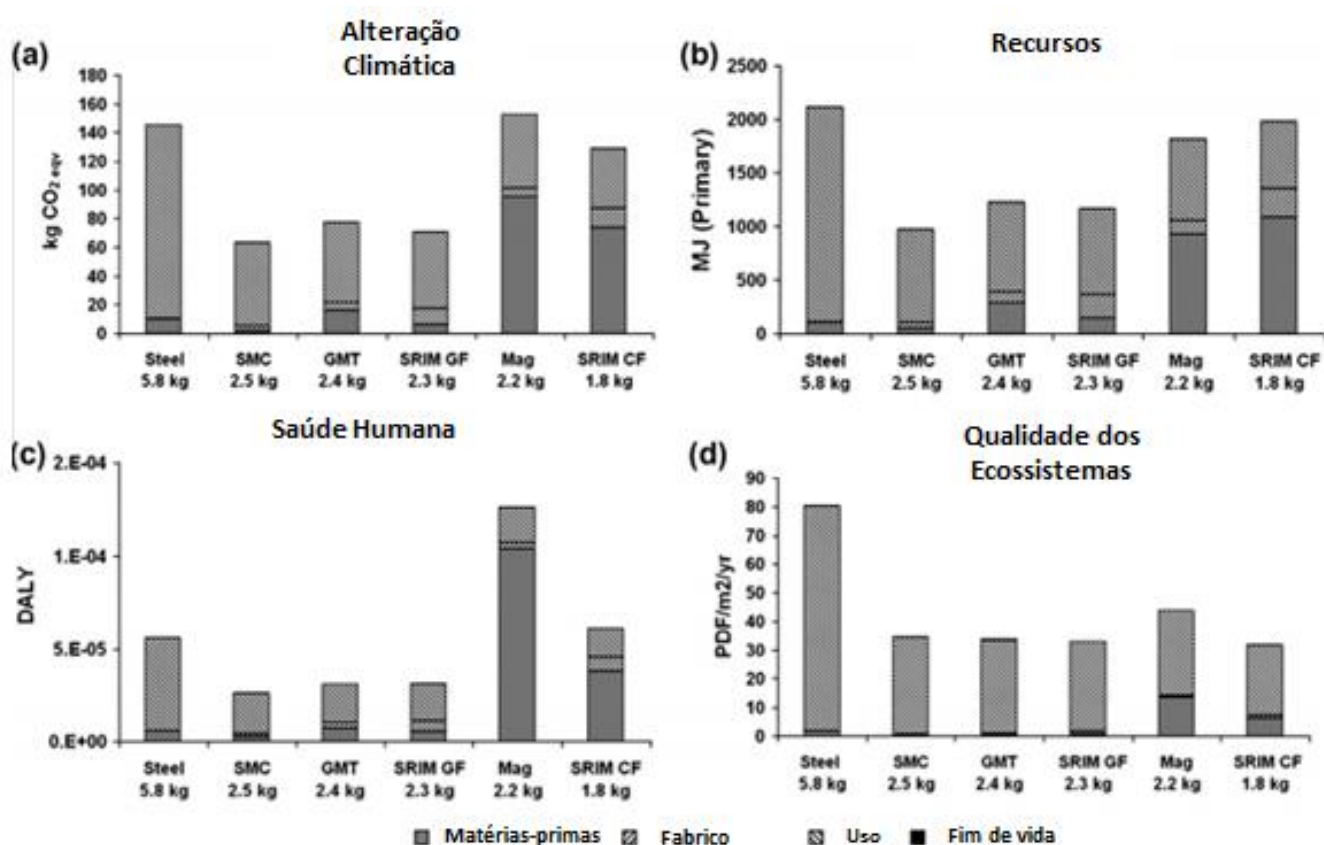


Figura 6 – Resultados do impacto ambiental para os quatro indicadores de impacto ambiental: Alteração Climática, Recursos, Saúde Humana, Ecossistemas. Os materiais encontram-se identificados no eixo horizontal e cada barra apresenta a contribuição das fases do ciclo de vida consideradas

Os resultados deste estudo indicam que a redução de peso num automóvel nem sempre leva a um melhor desempenho ambiental, uma vez que os materiais mais leves analisados exigem processos produtivos mais intensivos. O compósito de fibra de vidro com resina de poliéster não saturada foi o que apresentou um melhor desempenho do ponto de vista ambiental para todas as categorias de impacto, ainda que não tenha atingido o mesmo nível de redução de peso que os outros materiais. O estudo conclui ainda que os compósitos, apesar das dificuldades associadas à sua reciclagem, apresentam vantagens na redução do impacto ambiental de veículos, uma vez que os benefícios associados à redução do peso do veículo superam os potenciais benefícios da reciclagem.

2.2.5 Avaliação ambiental de métodos de produção alternativos para componentes compósitos de aviões

Apesar do estudo de Witik *et al.* (2012) não incidir diretamente sobre os materiais de interesse para esta dissertação, considera-se importante a sua referência uma vez que efetua uma avaliação ambiental de processos fora-de-autoclave (na literatura inglesa designado por OOA ou “out-of-autoclave”), que serão o tipo de processos abordados nesta dissertação. Os

processos fora-de-autoclave são alternativas ao processo tradicional de cura por autoclave que atingem a mesma qualidade que este. A Figura 7 apresenta os impactos ambientais associados a cada um dos processos fora-de-autoclave considerados, tendo o processo de autoclave como referência.

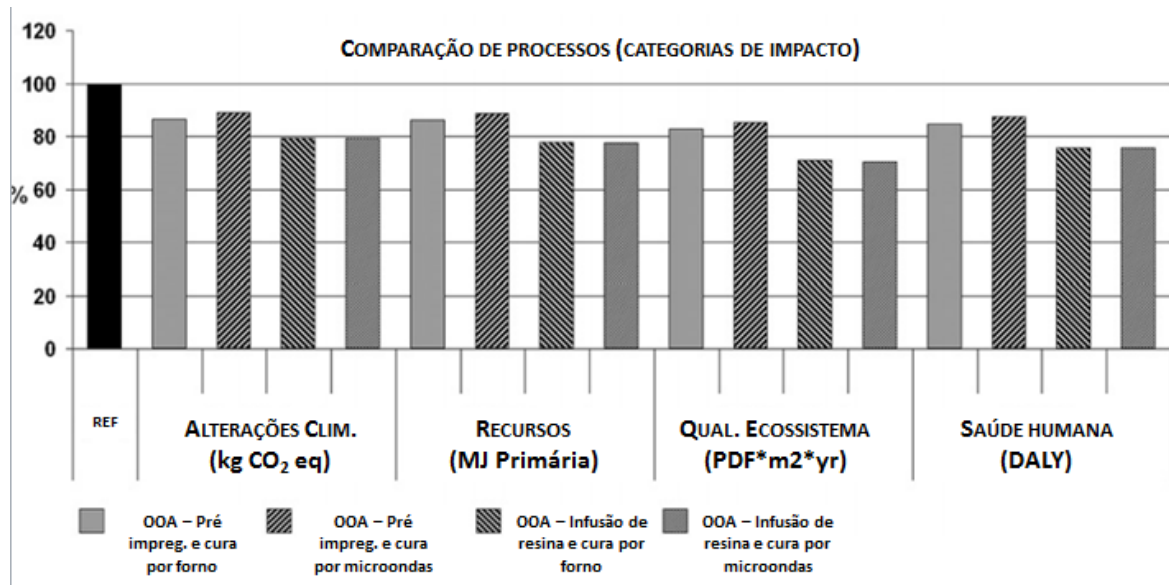


Figura 7 - Comparação de diferentes processos de fabrico para as categorias de impacto consideradas, usando o método Impact 2002+ (Witik et al., 2012)

O estudo conclui que todos processos fora-de-autoclave (pré-impregnação e cura por forno, pré-impregnação e cura por microondas, infusão de resina e cura por forno e infusão de resina e cura por microondas) apresentam um desempenho ambiental superior quando comparado com o processo realizado em autoclave, sendo que o processo de infusão de resina apresenta o melhor desempenho, apresentando reduções das emissões de dióxido de carbono de aproximadamente 20%.

3. SISTEMAS COMPÓSITOS

Os sistemas compósitos são sistemas constituídos por pelo menos dois materiais com propriedades físicas e químicas distintas, e que originam um material com características superiores às dos seus constituintes. Os constituintes de um sistema compósito são classificados em matriz ou reforço. O material da matriz tem como função garantir a transferência de carga para o reforço, podendo a matriz ser polimérica, cerâmica ou metálica. O material do reforço é geralmente uma fibra, podendo ser de origem natural ou artificial, e tem como função suportar as cargas e fornecer resistência e rigidez à estrutura. A Tabela 3 apresenta resumidamente as funções de cada um dos componentes dos sistemas compósitos.

Tabela 3 - Funções do reforço e da matriz em sistemas compósitos (adaptado de (Mazumdar 2002))

Componente	Função
Reforço	<ul style="list-style-type: none"> • Suportar as cargas; • Fornecer resistência e rigidez; • Fornecer estabilidade térmica;
Matriz	<ul style="list-style-type: none"> • Manter as fibras do reforço juntas; • Transferir as cargas para o reforço; • Dar forma à estrutura; • Proteção das fibras do meio ambiente;

Os sistemas compósitos podem ter ainda cargas e aditivos. O principal objetivo das **cargas** é **diminuir o preço** dos compósitos, sendo estas geralmente de mica, feldspato, sílica, argila ou quartzo. Deverão ter uma boa capacidade de dispersão, estabilidade de suspensão, baixa densidade e boa resistência ao calor. Quanto aos **aditivos**, utilizam-se para se obter uma **melhoria de algumas propriedades**, tendo como função diminuir a contração da matriz durante o processo de cura, melhorar a resistência ao fogo, a melhoria da tenacidade, a diminuição da emissão de voláteis, entre outros.

O presente trabalho pretende estudar a avaliação do ciclo de vida de uma carroçaria de autocarro fabricada em sistemas compósitos, mais especificamente em fibra de vidro e uma matriz termoendurecível de resina de poliéster não saturada, sendo por isso estes materiais abordados com mais detalhe nas secções seguintes.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro são o tipo de reforço mais utilizado e têm diversas aplicações em várias indústrias tais como a indústria automóvel e de transportes, indústria de componentes eletrónicos, indústria de construção, entre outros.

Estas fibras apresentam um **baixo custo, baixa densidade e boa resistência à corrosão**. As fibras de vidro são classificadas em fibras do tipo E, S ou R, dependendo a sua classificação do teor alcalino presente na fibra. O teor alcalino é o principal responsável pela resistência ao envelhecimento, sendo que fibras com teores alcalinos inferiores a 14% apresentam alterações menos significativas quando em contacto com agentes atmosféricos ou químicos desfavoráveis (Marques, 2013).

A fibra de vidro do tipo E é a mais utilizada. Esta é composta por um vidro de borossilicato com baixa quantidade de compostos alcalinos e apresenta boas propriedades mecânicas, elétricas e químicas. Para aplicações que exijam materiais com propriedades superiores, como por exemplo na indústria aeronáutica, as fibras do tipo S e R são as mais utilizadas. São produzidas a partir de vidros de alta resistência e apresentam uma tensão de rotura superior (D. V. Rosato 1964). A Tabela 4 apresenta algumas propriedades das fibras de vidro.

Tabela 4 - Propriedades das fibras de vidro do tipo E, S e R (Marques, 2013)

Propriedades	Tipo E	Tipo S	Tipo R
ρ (kg/m ³)	2600	2490	2550
E (GPa)	73	85,5	86
Tensão de rotura (GPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3	5,2
Coef. de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	5	2,9	4

Fabrico da fibra de vidro

As fibras de vidro são produzidas por estiramento de vidro fundido através de uma feira em liga de platina-ródio (temperatura de fusão de 1260 °C) com pequenos orifícios de onde são extraídos os filamentos, sendo que o diâmetro destes depende do diâmetro dos orifícios, da temperatura, da viscosidade da mistura e da velocidade de extrusão.

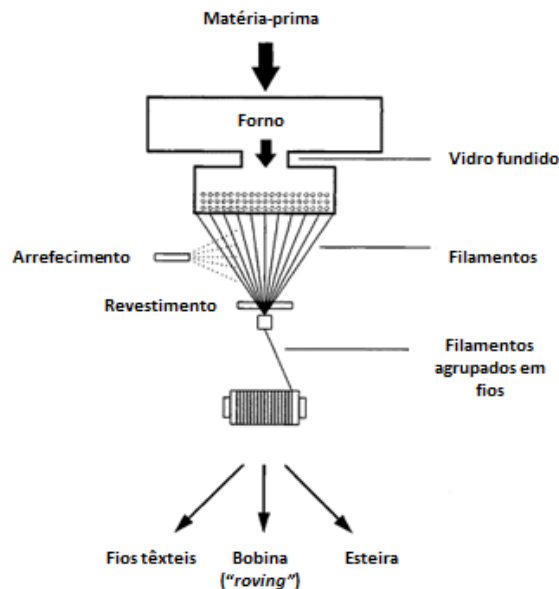


Figura 8 - Processo de fabrico da fibra de vidro (adaptado de (Rudd et al., 1997))

Os filamentos são em seguida arrefecidos em água e agrupados em fios. Antes de serem agrupados sofrem um **revestimento têxtil** para **evitar o risco de danificação das fibras** e um **revestimento plástico** que **permite a compatibilização da fibra com as matrizes** e contém um ligante para manter os filamentos unidos. São também utilizados **agentes de acoplamento** para **melhorar a adesão da fibra à matriz**. As fibras de vidro são higroscópicas, ou seja, possuem uma grande capacidade de absorção de água. Assim, o revestimento tem também a função de impedir o contacto com a humidade (Moura, 2005).

3.1.2 Matriz termoendurecível de resina de poliéster não saturada

Como já foi referido anteriormente, a matriz tem como função transferir a carga para o reforço e proteger as fibras do meio ambiente, podendo ser metálica, cerâmica ou polimérica. Dentro das matrizes poliméricas estas poderão ser termoplásticas ou termoendurecíveis. Abordar-se-ão apenas as matrizes termoendurecíveis de resina de poliéster não saturada, pois são as de interesse neste trabalho. Os termoendurecíveis são constituídos por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas e, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser reprocessados, sendo que uma vez aquecidos assumem uma forma permanente (Moura, 2005). A Tabela 5 apresenta algumas propriedades das principais resinas termoendurecíveis.

Tabela 5- Propriedades das resinas termoendurecíveis (Marques, 2013)

	ρ (kg/m ³)	Def. na rotura (%)	E (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Coef. de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)
Epóxico	1100-1400	1	2,1-6,0	35-90	55-110
Poliéster	1100-1500	1,5	1,3-4,5	45-85	100-200
Fenólica	1300	2,5	4,4	50-60	45-110
Polimida	1200-1900	1	3-3,1	80-190	14-90

As resinas de poliéster não saturadas são as mais utilizadas no mercado, devido ao seu **baixo custo** e à sua **facilidade de processamento** e fabrico. Algumas das suas características são a **boa resistência à corrosão** e **baixa viscosidade**. As resinas de poliéster não saturadas resultam da policondensação de ácidos dicarboxílicos com álcool dihidratado. Os álcoois mais utilizados são os glicóis de etileno, propileno, dietileno e dipropileno. As propriedades das resinas de poliéster são determinadas pela temperatura, composição, cura, entre outros (D. V. Rosato 1964).

A síntese destas resinas acarreta um grande impacto ambiental e, devido à sua elevada percentagem na constituição de um compósito, as resinas são muitas das vezes a causa para o grande impacto ambiental destes materiais. No entanto, a **adição de cargas** pode **diminuir o impacto ambiental** associado a este material, uma vez que reduz a quantidade de resina utilizada (Anderson et al., 2004).

Fabrico da resina de poliéster não saturada

O fabrico das resinas de poliéster não saturadas resume-se a dois passos: polimerização e cura. As matérias-primas necessárias para o fabrico das resinas de poliéster derivam praticamente todas do carvão ou petróleo, como se pode verificar na Figura 9.

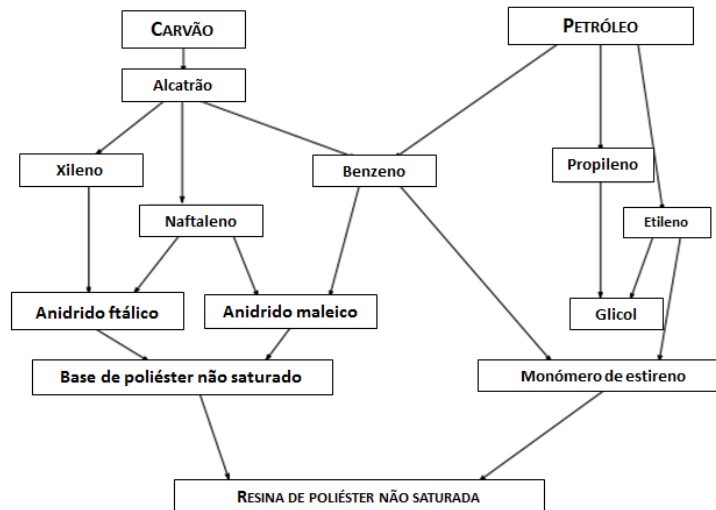


Figura 9 - Produção de matérias-primas derivadas do carvão e do petróleo (adaptado de (NZIC, 1998))

O poliéster é formado através da reação entre um álcool e um ácido a temperaturas entre os 170 e os 240 °C, sendo que a temperatura exata depende da mistura das matérias-primas selecionadas e das propriedades finais requeridas. Esta reação dá-se num reservatório, sendo muitas das vezes necessário catalisadores para acelerar a reação. Na maioria dos casos é utilizado um gás inerte (geralmente nitrogénio) para ajudar a remoção da água e para eliminar o oxigénio do processo. Uma vez atingido o ponto pretendido para as propriedades que se requerem, o poliéster é arrefecido e dissolvido num diluente reativo, que geralmente é um monómero de estireno. Daqui resulta uma solução de poliéster líquido à temperatura ambiente que, após a adição de aceleradores e catalisadores, irá curar até se tornar um polímero termoendurecível (NZIC, 1998).

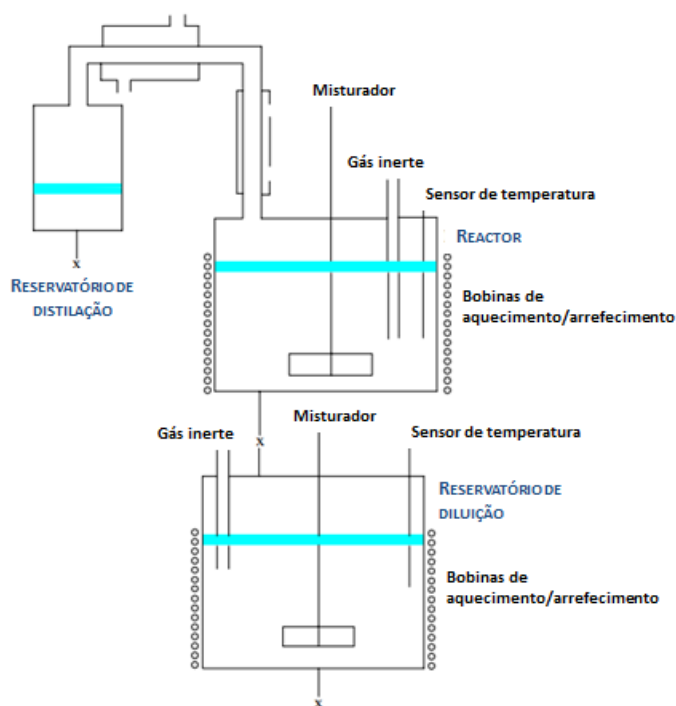


Figura 10 - Representação esquemática do processo de produção do poliéster (adaptado de (NZIC, 1998))

As resinas de poliéster não saturadas podem ser orto-, iso-, ou tereftálicas, dependendo do ácido utilizado na polimerização. As resinas ortoftálicas são as mais baratas e as mais utilizadas quando os requisitos estruturais não são elevados. As resinas isoftálicas apresentam propriedades estruturais e corrosivas muito boas, mas o seu custo elevado faz com que só sejam utilizadas quando as aplicações são muito exigentes. Por fim, as resinas tereftálicas são produzidas em volumes pequenos e a sua produção é bastante limitada. Isto deve-se ao fato de ser extremamente difícil de produzir resinas através da reação de um ácido tereftálico com um glicol propileno (Yang, 2002).

3.2 Opções de fim de vida dos sistemas compósitos

Os fatores ambientais são os mais críticos associados aos sistemas compósitos, devido à dificuldade de reciclagem de alguns destes materiais, como é o caso dos termoendurecíveis. Para além disso, os incentivos económicos à reciclagem destes materiais não são muito favoráveis, uma vez que a deposição de resíduos em aterros é uma opção bastante económica. Deste modo, é necessário a alteração da legislação, muitas vezes combinada com a aplicação de taxas, para se incentivar a reciclagem destes materiais. Uma das diretivas mais importantes é a Diretiva 99/31/EC para aterro de resíduos, bem como a diretiva para veículos em fim de vida, já referida anteriormente.

A gestão de resíduos tornou-se assim uma prioridade na União Europeia, com a seguinte hierarquia de importância no que diz respeito ao tratamento de resíduos (sendo o primeiro ponto o mais importante):

- Prevenção de resíduos através da seleção de materiais e processos;
- Reutilização do produto;

- Reciclagem do material;
- Incineração de resíduos
 - Com recuperação de material e de energia;
 - Com recuperação de energia;
 - Sem recuperação de energia;
- Aterro.

3.2.1 Reutilização

A reclassificação e recertificação dos materiais são necessárias se o componente ou material for reutilizado para outra aplicação, o que implica que muitas das vezes a reutilização de um compósito pode não ser a opção mais apropriada.

Os sistemas compósitos utilizados em aplicações estruturais são de **difícil reutilização**, uma vez que se torna complexo recalcular as suas propriedades de rotura após utilização. Para além disso, a **recertificação** dos sistemas compósitos implica **custos económicos elevados** se for necessário testar o componente (Halliwell, 2006).

3.2.2 Recuperação

Para que o processo de reciclagem seja simplificado e economicamente viável, os resíduos compósitos deverão ser recuperados de modo a torná-los o mais “puros” possível. Isto poderá ser uma tarefa complexa, uma vez que estes materiais estão muitas vezes associados a outros materiais através de adesivos estruturais, por exemplo; também poderão estar contaminados devido a exposição a químicos durante a sua utilização (Halliwell, 2006).

3.2.3 Reciclagem

Apesar da reciclagem dos compósitos termoplásticos estar largamente difundida, uma vez que estes podem ser fundidos e novamente utilizados, a reciclagem dos termoendurecíveis é também possível. Nesta secção presta-se especial atenção à reciclagem dos termoendurecíveis, uma vez que o material utilizado no fabrico da carroçaria é deste tipo. A dificuldade de reciclagem dos termoendurecíveis deve-se ao facto de estes apresentarem cadeias de ligações cruzadas, o que impossibilita a sua fundição e reutilização. No entanto, alguns polímeros termoendurecíveis, como é o caso do poliuretano, podem ser convertidos facilmente ao seu monómero² original. No caso das resinas termoendurecíveis como as de epóxido e poliéster, a despolimerização não é prática (Halliwell, 2006).

Os processos de reciclagem para os compósitos termoendurecíveis podem ser de origem **mecânica** ou **térmica**, tal como se encontra representado esquematicamente na Figura 11.

² Monómero – molécula elementar que, ao associar-se a outros monómeros, origina um polímero

³ Enxertia – consiste na fixação de uma cadeia polimérica num polímero estruturalmente diferente

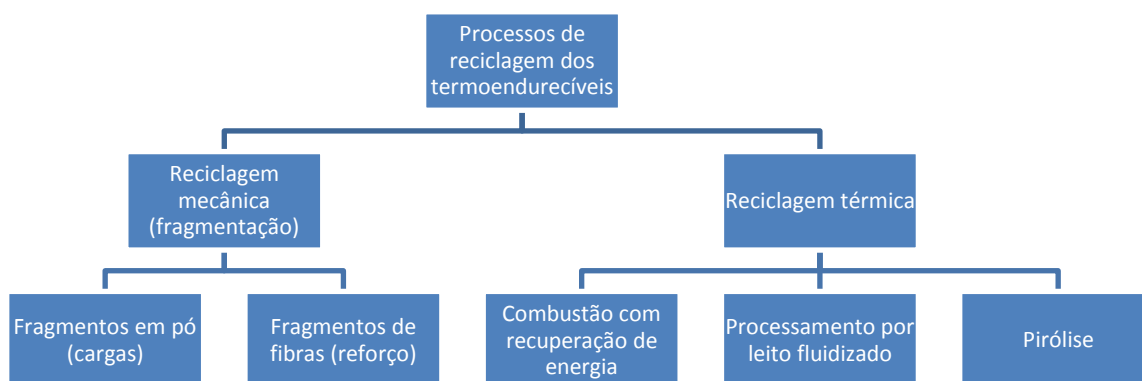


Figura 11 - Processos de reciclagem para os compósitos termoendurecíveis (adaptado de (Pickering, 2006))

Reciclagem mecânica

A reciclagem mecânica consiste em reduzir os resíduos compósitos em partículas mais pequenas na ordem dos 50-100 mm de tamanho. Na segunda fase é utilizado um martelo de moagem para reduzir as partículas em fragmentos ainda mais pequenos que podem estar compreendidos entre os 10 mm e os 50 μm . Estas partículas são depois agrupadas de acordo com o seu tamanho. Os **fragmentos mais pequenos** estão reduzidos a pó e **podem ser utilizados como cargas**, enquanto os **fragmentos maiores** apresentam uma quantidade elevada de fibra e **podem ser utilizados como reforço**.

Relativamente aos **fragmentos em pó**, estes **podem substituir o carbonato de cálcio** nos compósitos SMC (“*Sheet Moulding Compound*”). A grande vantagem é que os fragmentos resultantes da reciclagem têm uma densidade menor que o carbonato de cálcio, **tornando assim o composto mais leve**. Quanto aos fragmentos maiores, verifica-se que a utilização destes como reforço é mais difícil, uma vez que apresentam diminuições na resistência e dureza devido à fraca adesão entre os fragmentos reciclados e o polímero. Em geral, verifica-se que os reforços reciclados apresentam propriedades inferiores às do seu estado virgem. No entanto, o uso de enxertos³ e agentes de acoplamento pode aumentar as propriedades do reciclado entre 45 e 65% (Pickering, 2006).

Reciclagem térmica

Combustão com recuperação de energia

Os polímeros termoendurecíveis apresentam um poder calorífico na ordem dos 30000 kJ/kg, podendo assim ser queimados e **utilizados como uma fonte de energia**. Uma vez que

³ Enxertia – consiste na fixação de uma cadeia polimérica num polímero estruturalmente diferente [(Bhattacharya e Misra, 2004)]

as fibras geralmente são incombustíveis, o poder calorífico depende apenas da quantidade de polímero presente no compósito, bem como o rendimento do processo. Após a combustão, os fragmentos de **fibras de vidro** podem **ser utilizados como carga em cimentos** (Pickering, 2006).

Processamento por leito fluidizado

Neste processo, os componentes são reduzidos a um tamanho de cerca de 25 mm e são dispostos sobre um leito de areia de sílica fluidizada com ar quente, com velocidades entre os 0,4 e 1,0 m/s e temperaturas entre os 450 e 550 °C. Neste leito fluidizado, o polímero volatiliza-se do compósito e permite que as fibras e as cargas sejam transportadas como partículas através da corrente do ar quente. As fibras são então separadas do gás numa câmara secundária de combustão, onde o polímero se oxida totalmente e a energia resultante dos produtos de combustão pode ser aproveitada. Compósitos de poliéster reforçados com fibra de vidro, o material em estudo, podem ser processados a 450 °C, temperatura à qual o polímero volatiliza e liberta as fibras. A esta temperatura a fibra de vidro sofre uma redução de cerca de 50% da sua tensão limite de elasticidade, mas mantém a mesma rigidez. A temperaturas mais elevadas, as propriedades mecânicas sofrem uma maior redução. A grande vantagem deste processo é que **permite a utilização de qualquer tipo de mistura**, mesmo que os compósitos estejam contaminados (Pickering, 2006).

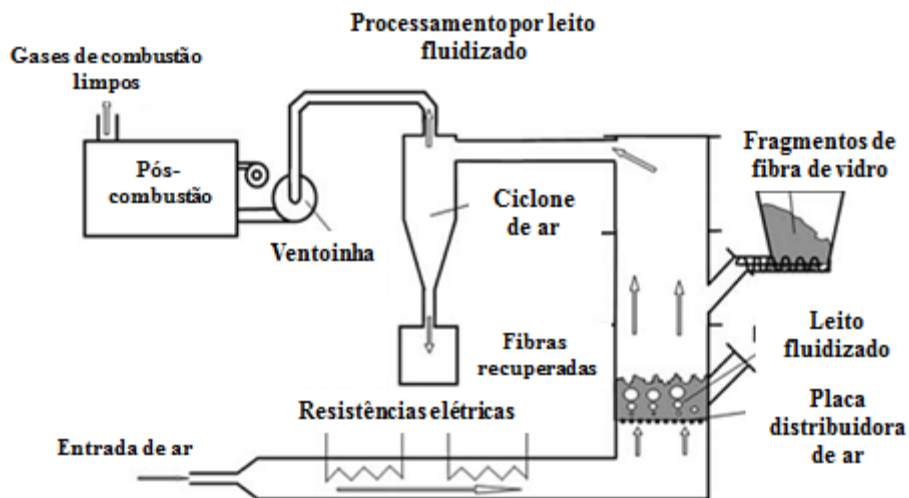


Figura 12 - Processo de reciclagem por leito fluidizado (adaptado de (Pickering, 2006))

Pirólise

O processo de pirólise consiste na decomposição dos materiais por ação do calor na ausência de oxigénio. Este processo degrada a estrutura molecular do polímero, originando substâncias moleculares mais pequenas e produtos derivados do petróleo. A pirólise permite que o material polimérico de um compósito seja recuperado e seja utilizado para processamento químico posterior. Para além disso, **permite a recuperação das fibras**, uma vez que estas não são afetadas pelo processo. No entanto, para que estas sejam recuperadas em boas condições, as temperaturas do processo não podem ser muito elevadas, devendo

andar na ordem dos 400 °C. A esta temperatura a estrutura molecular do polímero rompe-se, no entanto algumas propriedades mecânicas das fibras são afetadas. O processo de pirólise abaixo dos 400 °C não é satisfatório, uma vez que não é suficiente para o polímero se decompor.

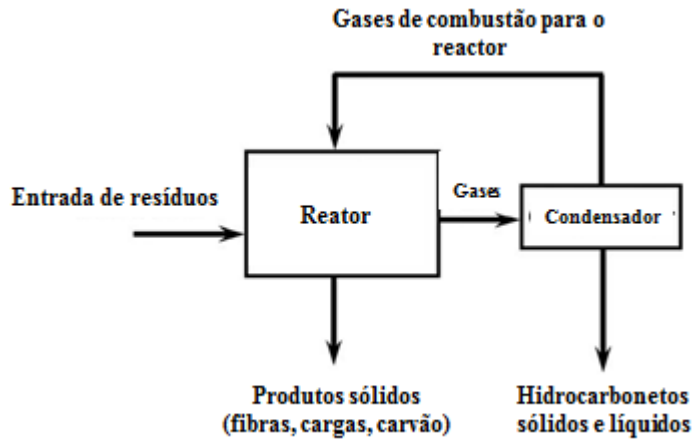


Figura 13 - Processo de pirólise (adaptado de (Pickering, 2006))

É importante referir que, apesar da gestão de resíduos levada a cabo pela União Europeia dar preferência às estratégias de reciclagem que maximizem a recuperação de material, estas podem nem sempre trazer o melhor retorno ambiental nem económico. Muitas vezes, os recursos necessários para se proceder à reciclagem dos sistemas compósitos são bastante superiores aos necessários para se proceder à incineração com recuperação de energia, por exemplo. Para se identificar quais as estratégias que são mais aceitáveis é necessário realizar auditorias ambientais e, apesar de já existirem alguns estudos na área, um estudo mais aprofundado precisa de ser feito (Halliwell, 2006).

3.3 Processos de Fabrico

Os processos de fabrico de sistemas compósitos diferem consoante a matriz seja termoplástica ou termoendurecível. A Figura 14 apresenta de forma resumida os processos de fabrico mais comuns.

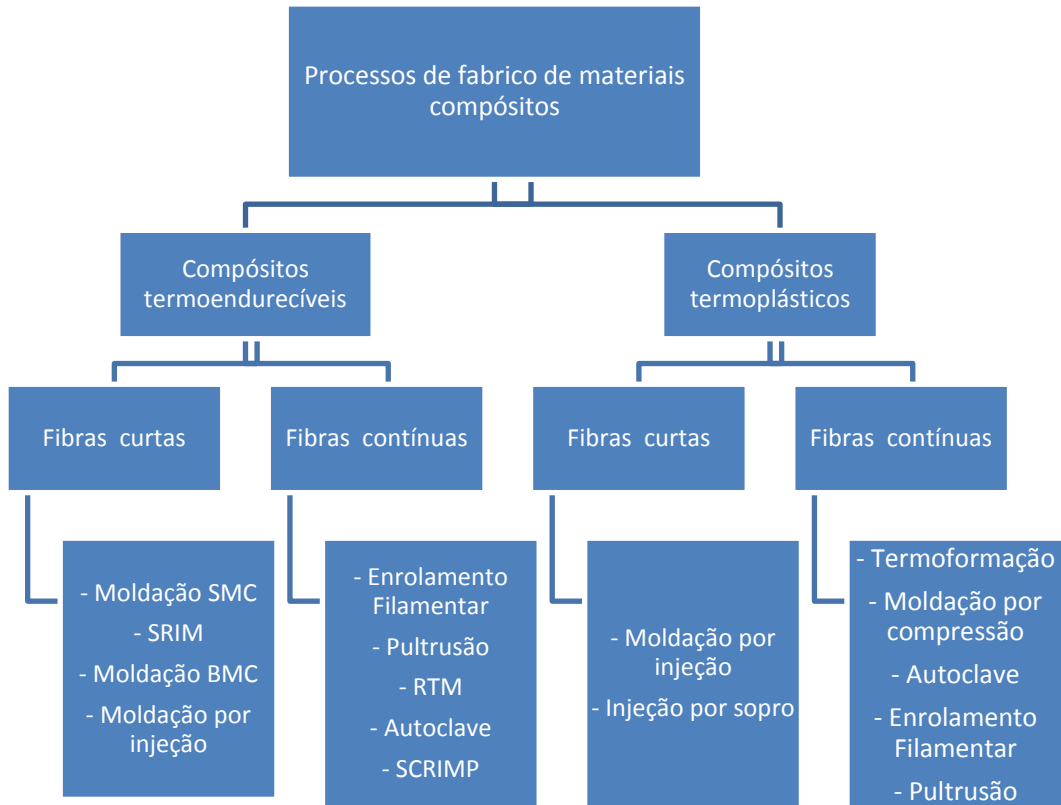


Figura 14 - Processos de fabrico dos sistemas compósitos (adaptado de (Mazumdar, 2002))

Os processos de fabrico podem ainda ser distinguidos entre processos em molde aberto ou processos em molde fechado. Nos processos em molde aberto apenas um dos lados da peça apresenta um bom acabamento superficial. No entanto, este tipo de processos permite o fabrico de componentes de grandes dimensões e de geometrias complexas. Nos processos em molde fechado ambas as superfícies da peça apresentam um bom acabamento superficial e as emissões de produtos voláteis, nomeadamente o monómero de estireno, são menores (Moura, 2005). Serão referidos com mais pormenor os processos utilizados para o fabrico da carroçaria do autocarro em estudo, a qual é obtida por enrolamento filamentar seguida do processo RTM – Moldação por Transferência de Resina. Este último é um processo designado como sendo fora-de-autoclave. Os processos fora-de-autoclave permitem uma **redução do consumo de energia** e não necessitam de um investimento de capital e de ferramentas tão elevado como no autoclave, permitindo assim fabricar compósitos com um **melhor custo-benefício** e mais favoráveis do ponto de vista ambiental (Witik et al., 2012) (Broslus, 2014).

3.3.1 Enrolamento filamentar

O enrolamento filamentar é um processo de fabrico adequado à produção de componentes tubulares no qual fibras são enroladas em torno de um mandril rotativo. As fibras poderão passar por um banho de resina imediatamente antes de serem enroladas (processo molhado) ou poderão estar previamente impregnadas (processo pré-impregnado) (D. V. Rosato 1964).

As fibras poderão ser ainda enroladas a seco, dando origem a pré-formas a utilizar em processos posteriores, como o processo RTM, por exemplo. Uma pré-forma não é mais do que uma forma previamente moldada na forma final que se pretende obter, em que as fibras são orientadas de acordo a forma, contorno e espessura da peça final. As pré-formas a seco permitem “fixar” as fibras na orientação desejada, de acordo com o volume de fibra previsto, e **minimizar o trabalho manual** necessário à deposição manual. Para além disso, apresentam **uniformidade** e tornam o **processo de moldação mais eficiente**, reduzindo o seu tempo, uma vez que se obtém uma forma bastante próxima da final (Black, 2013).

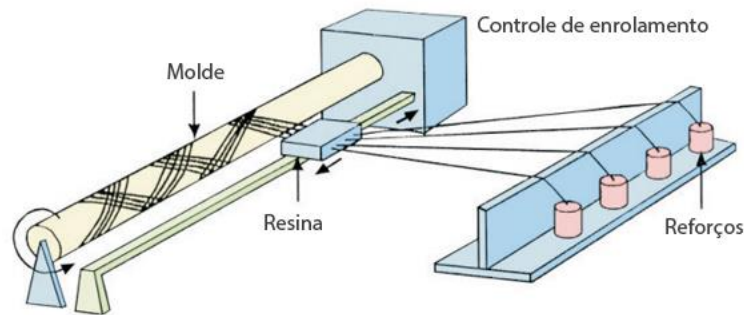


Figura 15 - Representação do processo de enrolamento filamentar (Fiberglass)

O enrolamento é feito por rotação do mandril, enquanto que a fibra vai sendo orientada consoante a direção do enrolamento. Após o enrolamento estar terminado, a peça é deixada a curar e é retirada do mandril. Este processo permite orientar as fibras na direção do carregamento e utiliza filamentos contínuos, que suportam as cargas de uma maneira mais eficiente que os reforços descontínuos. Existem três padrões de enrolamento:

- Circunferencial;
- Polar;
- Helicoidal.

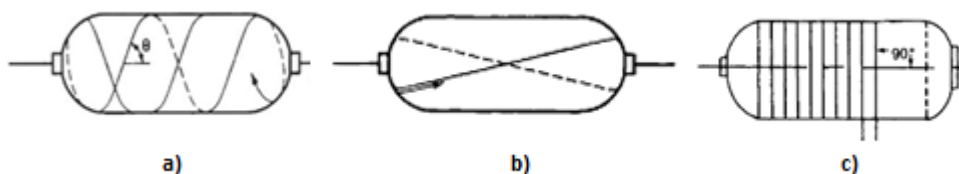


Figura 16 - Padrões de enrolamento: a) Enrolamento helicoidal, b) Enrolamento polar, c) Enrolamento circunferencial (Campbell, 2004)

O enrolamento circunferencial é o padrão mais simples e consiste no enrolamento das fibras perpendicularmente ao eixo de rotação do mandril, com a carruagem de deposição da fibra a avançar uma banda de largura por cada rotação do eixo, obtendo-se assim múltiplas camadas unidireccionais perpendiculares. Este padrão de enrolamento é muitas vezes combinado com enrolamentos polares e helicoidais para fornecer resistência à peça a ser produzida.

No enrolamento polar, os filamentos passam tangencialmente às aberturas polares existentes nos topos das peças que se pretende fabricar, resultando assim um enrolamento plano, em que as bandas de filamentos vão sendo colocadas adjacentes umas às outras.

O padrão de enrolamento helicoidal é o padrão mais flexível, pois permite praticamente qualquer combinação entre o comprimento da peça a produzir e o seu diâmetro, e é também o mais utilizado. Este caracteriza-se pela rotação do mandril enquanto a carruagem de deposição da fibra efetua um movimento de translação à velocidade necessária para gerar o ângulo helicoidal desejado, originando peças com bandas unidireccionais com um determinado grau de entrecruzamentos entre as fibras (Campbell, 2004).

Por fim, é importante referir que uma conceção correta do mandril é fundamental para a qualidade das peças a produzir. Este deve ter uma **boa precisão dimensional e não deve gerar tensões residuais** durante o processo de cura. Caso se pretenda remover o mandril, este deve ser projetado de forma a **evitar a danificação das fibras** durante o processo de remoção. A Tabela 6 apresenta de forma resumida as vantagens e desvantagens do processo de enrolamento filamentar.

Tabela 6 - Vantagens e desvantagens do enrolamento filamentar (adaptado de (Mazumdar, 2002))

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil automação; • Permite a deposição da fibra de forma exata e repetitiva; • Faz uso de filamentos contínuos, sendo possível orientar as fibras na direção do carregamento; • Permite a obtenção de estruturas grandes; • Baixo custo de matérias-primas. 	<ul style="list-style-type: none"> • A forma do componente a produzir deve permitir a remoção do mandril; • Não permite uma mudança fácil do padrão de enrolamento dentro da mesma camada; • Está limitado à produção de estruturas convexas; • Nem todos os ângulos de enrolamento são adequados (ângulos entre 0 a 15° não são apropriados); • A necessidade de um mandril pode tornar-se algo complexo e economicamente dispendioso; • Os componentes apresentam um aspeto superficial rugoso.

Colocação de fibra

O processo de colocação de fibra – geralmente designado por “*fiber placement*”, “*tow placement*” ou ainda “*automated fiber placement*” – é um processo que surgiu como uma maneira de depositar camadas de materiais pré-impregnados em bandas de uma **maneira precisa e eficaz**. Este processo é utilizado na indústria aeroespacial e em aplicações de alto

desempenho, onde se pretende que o trajeto da fibra dentro de uma determinada camada seja traçado para que esteja em conformidade com as condições de carregamento locais. Consequentemente, muitas das vezes é desejado “orientar” a banda de fibra em vários ângulos de forma a **otimizar a capacidade de suporte de carga** da estrutura (Beckwith, 2008). A Figura 17 ilustra uma máquina de colocação de fibra em funcionamento, a construir uma peça para um avião.



Figura 17 - Máquina de colocação de fibra (lado direito) a construir uma peça complexa e de alto desempenho para um avião (Beckwith, 2008)

O processo de colocação de fibra permite ainda a **remoção e adição de material** permitindo assim a expansão da peça, por exemplo, ou a existência de áreas abertas (necessárias para portas, janelas, etc). Assim, os desperdícios associados a este processo são bastante inferiores pois os materiais são utilizados de uma maneira mais eficiente.

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre o processo de colocação de fibra e o enrolamento filamentar, evidenciando as semelhanças e diferenças entre vários parâmetros de fabrico.

Tabela 7 – Comparação entre o processo de enrolamento filamentar e o de colocação de fibra (adaptado de (Beckwith, 2008))

	Enrolamento Filamentar	Colocação de Fibra
Mandril	Necessita de algum tipo de mandril, mas geralmente não se usa autoclave para a cura	Necessita de algum tipo de mandril, que geralmente é construído para entrada subsequente em autoclave
Aplicação da resina	<ul style="list-style-type: none"> • Enrolamento molhado; • Pré-impregnados; • Enrolamento a seco. 	Pré-impregnados
Tensão nas fibras	Os filamentos estão continuamente sob tensão durante o enrolamento e só são “cortados” quando este termina	As mechas de fibra não se encontram sob tensão, mas são colocados numa superfície e compactados através de um rolo que aplica uma pressão “normal”
Adição/Remoção de fibras	As fibras não são cortadas nem adicionadas durante o processo	As fibras podem ser adicionadas ou removidas em qualquer fase do processo
Mecanismo de corte das fibras	Não é aplicável	Corte mecânico ou a laser
Orientação das fibras	As fibras encontram-se tensionadas e seguem um determinado padrão de enrolamento	As fibras podem ser “orientadas” segundo diferentes trajetórias e ângulos sobre a superfície, pois não se encontram tensionadas
Resinas aplicáveis	<ul style="list-style-type: none"> • Poliéster; • Poliuretano; • Fenólicas; • Epóxicas; • Poliamidas; • Várias matrizes termoplásticas 	As resinas estão limitadas a sistemas pré-impregnados comprovados: <ul style="list-style-type: none"> • Epóxicas; • Algumas matrizes termoplásticas.

Apesar da Tabela 7, adaptada de Beckwith (2008), indicar que o processo de colocação de fibra automática utiliza apenas pré-impregnados, estudos têm vindo a ser desenvolvidos, principalmente na indústria aeroespacial, no sentido de se utilizar este processo recorrendo-se a fibras no estado seco. A título de exemplo, a empresa *AeroComposit* pretende construir a primeira asa e caixa da asa para um avião comercial em sistemas compósitos recorrendo à deposição automática de fibras a seco e cura por processo fora-de-autoclave, argumentando que esta escolha se irá traduzir numa **redução dos custos** bem como numa **melhoria na capacidade de produção**, associado a uma **redução do peso** do avião (Gardiner, 2014).

3.3.2 RTM – Moldação por Transferência de Resina

O processo RTM consiste na inserção de uma pré-forma na cavidade de um molde e na consequente injeção de resina. A pré-forma é inserida em metade do molde e a outra metade do molde é em seguida acoplada. Quando o molde se encontra totalmente preenchido e a pré-forma saturada pela resina, após a sua catalisação é retirado o compósito moldado e deixado a curar durante um determinado período de tempo. Daqui resultam peças estruturais com um **bom acabamento superficial** em ambos os lados. O processo RTM difere do processo de moldação por injeção, pois este está limitado à utilização de fibras curtas, e do processo de moldação por compressão pois permite a realização de formas mais complexas. O RTM permite a produção de componentes estruturais de **baixo custo** se o volume de produção for médio e utiliza **ferramentas de relativamente baixo custo** (Mazumdar, 2002) (Moura, 2005).

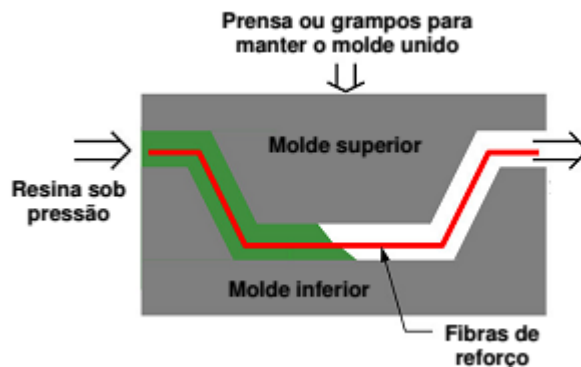


Figura 18 - Representação do processo RTM (adaptado de (Song, 2003))

O preenchimento total da cavidade do molde com resina é extremamente importante, garantindo que não existem bolhas de ar nem zonas secas no reforço. Para uma boa impregnação é necessário ter em conta vários fatores, tais como: pressão de injeção, temperatura da resina, viscosidade e adesão da fibra à resina, que por sua vez depende do tipo de fibra, da fração volúmica das fibras, entre outros. A transferência de resina é efetuada com pressão baixa e o molde pode ser selado através de uma prensa atuada por sistema hidráulico ou pneumático ou através de grampos de pressão (Mazumdar, 2002). Apresenta-se de seguida os passos básicos para o fabrico de uma peça pelo processo RTM:

1. Uma resina termoendurecível e um catalisador são colocados em dois tanques distintos do equipamento de distribuição;
2. É aplicado um gel desmoldante ao molde para facilitar a desmoldagem da peça posterior. Também pode ser aplicado um *gel-coat* para se obter um bom acabamento superficial;
3. A pré-forma é colocada no molde e o molde é selado;
4. O molde é aquecido até uma determinada temperatura;
5. A resina misturada com o catalisador é injetada no molde através de orifícios de entrada a uma determinada temperatura e pressão. Pode ser gerado vácuo no interior

do molde para ajudar o fluxo de resina e para remover bolhas de ar que possam estar presentes;

6. A resina é injetada até o molde estar completamente preenchido. A bomba de vácuo é desligada e o orifício de entrada é fechado;
7. A peça é deixada a curar por um determinado período de tempo e depois é removida do molde.

Por fim, sendo um processo em molde fechado, as emissões de voláteis são inferiores quando comparadas com os processos em molde aberto, sendo por isso um processo **ambientalmente favorável** (Mazumdar, 2002) (Anderson et al., 2004).

A Tabela 8 apresenta resumidamente as vantagens e desvantagens associadas a este processo.

Tabela 8 - Vantagens e desvantagens do processo RTM (adaptado de (Mazumdar, 2002))

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Investimento inicial baixo quando comparado com outros processos como autoclave; • Fabrico de partes complexas para volumes de produção médios; • Bom acabamento superficial de ambos os lados; • Produção de componentes estruturais; • Baixa emissão de gases tóxicos; • Produção de formas próximas do produto final; • Possibilidade de automatização. 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo dos moldes relativamente elevado; • O fabrico de partes complexas requer a necessidade de experimentação devido à possibilidade de existência de bolhas de ar ou partes de fibra seca.

O processo RTM apresenta ainda algumas variantes, apresentando-se em seguida duas delas: o processo VARTM – Moldação de transferência de resina assistida por vácuo - e o processo SCRIMP – Processo de moldação de compósitos por infusão de resina de Seemann.

VARTM – Moldação por Transferência de Resina assistida por vácuo

O processo VARTM é uma variante do processo RTM adequado para a produção de peças de grande volume. Neste processo é **utilizada somente a pressão de vácuo** para a infusão da resina e os custos de ferramentas são reduzidos uma vez que **necessita apenas de um molde** para o fabrico das peças.

No processo de infusão, a pré-forma é colocada no molde e uma cobertura, que pode ser rígida ou flexível, é colocada por cima da mesma de forma a compactar e selar a pré-forma. É então utilizada a pressão a vácuo para conduzir a resina através da pré-forma, até à sua saturação. A maior vantagem do VARTM é a possibilidade de fabricar **peças de grande volume** utilizando **ferramentas de baixo custo**. O processo VARTM apresenta-se ainda como uma solução conveniente do ponto de vista ambiental, uma vez que o desperdício de resina e as **emissões de estireno são reduzidas** a um mínimo ou até mesmo eliminadas (Mazumdar, 2002) (Campbell, 2004).

SCRIMP – Processo de moldação de compósitos por infusão de resina de Seemann

O processo SCRIMP é uma variante do processo RTM muito similar ao VARTM, em que também é utilizada somente a pressão de vácuo para a infusão de resina. O princípio associado ao processo SCRIMP é a criação de uma zona de alta permeabilidade que acelera a distribuição de resina. Para além disso, o SCRIMP utiliza um sistema de distribuição de resina patenteada, permitindo tempos de infusão curtos sobre grandes áreas (Campbell, 2004). A Figura 19 representa o processo SCRIMP.

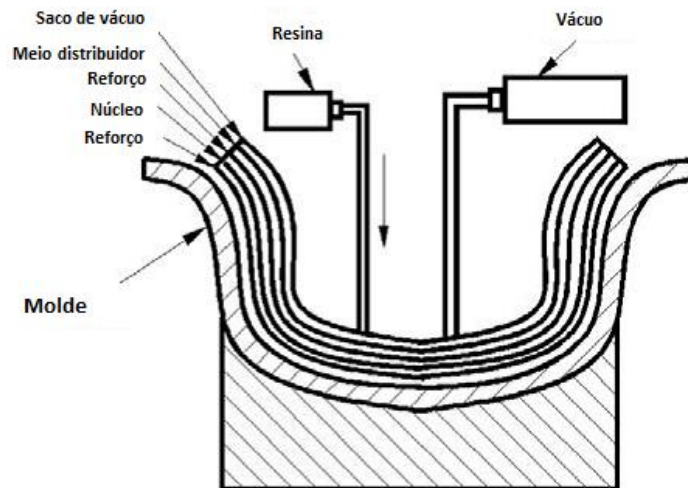


Figura 19 - Representação do processo SCRIMP (adaptado de (Mazumdar, 2002))

A seguir à inserção da pré-forma no molde insere-se um meio distribuidor, ou seja, um material de alta permeabilidade que aumenta a velocidade do fluxo de resina e permite o fluxo na direção transversal da pré-forma e, por fim, insere-se um saco de vácuo. Quando a pressão de vácuo é aplicada, a pré-forma é compactada e um gradiente de pressão é produzido no interior do sistema, permitindo assim a infusão de resina.

3.4 Critérios de rotura

A resistência dos materiais, ou de sistemas materiais, sujeitos a um carregamento multiaxial pode ser prevista com base em diferentes critérios de rotura. Os critérios de rotura relacionam a resistência do material com o estado genérico de tensão-deformação devido a um carregamento multiaxial. Esta secção aborda os critérios de rotura frequentemente utilizados em sistemas compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras, referindo com mais pormenor o critério de Hashin (1980), pois será o de interesse nesta dissertação.

Os critérios de rotura para sistemas compósitos podem ser classificados em:

- **Critérios de rotura associados aos modos de rotura ou fenomenológicos** – quando o critério de rotura prevê a possibilidade de ocorrência de cada um dos modos de rotura separadamente (critério da tensão máxima, da deformação máxima, Hashin, Hashin-Rotem e Puck).
- **Critérios de rotura não associados aos modos de rotura ou não fenomenológicos** – quando o critério apenas pretende prever se há ou não rotura, sem esclarecer qual o modo segundo o qual o material rompe e impossibilitando portanto a previsão dos efeitos de rotura nas propriedades mecânicas (critério de Tsai-Wu, Tsai-Hill, Azzi-Tsai, Hoffman e Chamis) (Pinho, 2005).

Os critérios de rotura podem ainda dividir-se em três grupos: critérios não-interativos, critérios interativos e critérios parcialmente interativos. Os **critérios não-interativos** não têm em conta os efeitos combinados das várias componentes do tensor das tensões. Pertencem a este grupo o critério da tensão máxima, que prevê a rotura quando uma das componentes do tensor das tensões atinge a tensão de rotura correspondente, e o critério da deformação máxima, segundo o qual a rotura se dá quando uma das deformações atinge o respetivo valor de rotura. Nos **critérios interativos**, todas as componentes do tensor das tensões e do tensor das deformações são combinadas numa expressão. Dentro deste grupo inclui-se o critério de Tsai-Wu, Hoffman, Tsai-Hill e Chamis. Os **critérios parcialmente interativos** visam atingir um compromisso entre a interatividade e capacidade de distinguir modos de rotura, de modo a permitir a existência de diferentes formulações para diferentes modos de rotura. Dentro deste grupo apresentam-se o critério de Hashin, Hashin-Rotem e de Puck (Moura, 2005) (Pinho, 2005).

Tipicamente, os critérios de rotura são apresentados como expressões matemáticas denominadas **funções do critério de rotura** (f). As funções do critério de rotura são definidas de tal forma que, quando nenhuma carga é aplicada a função tem o valor “0” (zero), e o valor “1” (um) corresponde à falha ou rotura do material. Apresenta-se em seguida o critério de Hashin, que será o critério utilizado posteriormente nesta dissertação.

3.4.1 Critério de Hashin

Segundo Hashin (1980), um critério de falha ideal para compósitos unidirecionais deve distinguir entre os vários modos de falha possíveis e modelar cada um separadamente, considerando que a identificação de cada modo de falha é indispensável para a modelização

da propagação de danos. O critério de Hashin (1980) para um estado de tensão tridimensional modela separadamente quatro modos de falha, traduzindo-se assim nas seguintes equações:

Rotura das fibras por tração:

$$f_f^t = \left(\frac{\sigma_1}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12} + \sigma_{13}}{S} \right)^2, \sigma_1 \geq 0$$

Equação 1 – Falha das fibras por tração (Hashin, 1980)

Rotura das fibras por compressão:

$$f_f^c = \frac{-\sigma_1}{X_c}, \sigma_1 \leq 0$$

Equação 2 – Falha das fibras por compressão (Hashin, 1980)

Rotura da matriz por tração:

$$f_m^t = \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_t} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S^2}, \sigma_2 + \sigma_3 \geq 0$$

Equação 3 – Falha da matriz por tração (Hashin, 1980)

Rotura da matriz por compressão:

$$f_m^c = \left(\frac{\sigma_2}{2S} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_2}{Y_c}, \sigma_2 + \sigma_3 \leq 0$$

Equação 4 – Falha da matriz por compressão (Hashin, 1980)

3.5 Estruturas em sanduíche

Uma vez que se pretende que a carroçaria em sistemas compósitos seja construída como uma estrutura em sanduíche, nesta secção apresenta-se o conceito das estruturas em sanduíche e os principais modos de falha das mesmas.

3.5.1 Conceito

As estruturas em sanduíche são bastante utilizadas na indústria aeroespacial uma vez que é uma solução estrutural **extremamente leve** que apresenta uma **alta rigidez** e um **excelente rácio rigidez-peso**. O conceito base de um painel em sanduíche é que as faces aguentem os esforços de flexão enquanto o núcleo suporta os esforços de corte, evitando o deslizamento das faces. As estruturas em sanduíche típicas apresentam faces muito finas com elevada resistência estrutural e um núcleo bastante espesso mas de baixa densidade (Campbell, 2004).

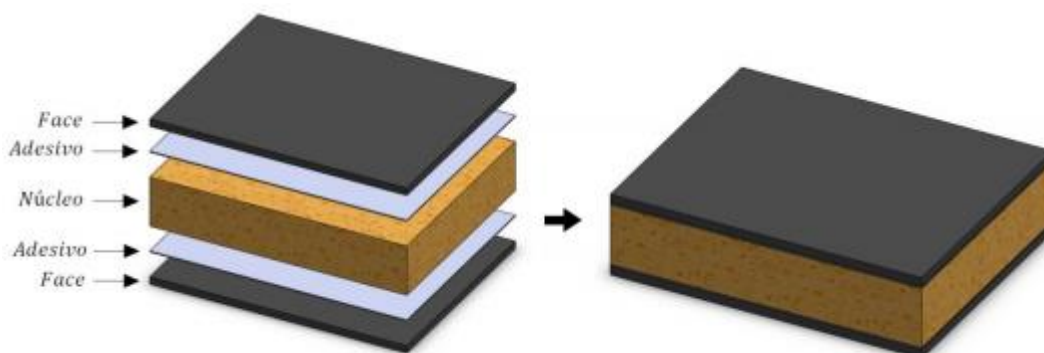


Figura 20 - Constituição de uma estrutura em sanduíche (Belbute, 2010)

Os materiais que geralmente constituem as faces das estruturas em sanduíche são alumínio, fibra de vidro, carbono ou aramida, enquanto para os núcleos se utiliza madeira de balsa, cortiça, espumas poliméricas ou favos de abelha. Dentro das espumas poliméricas, as mais utilizadas são as de poliuretano, poliestireno, PVC e resina fenólica. Estas caracterizam-se em geral pela sua baixa densidade aliada ao seu baixo custo. Realçam-se as principais propriedades de interesse nos materiais do núcleo:

- **Densidade** – pretende-se uma solução leve;
- **Resistência ao corte** – é o núcleo que suporta os esforços de corte;
- **Rigidez e resistência à compressão** – os materiais do núcleo devem suportar as cargas perpendiculares às faces da estrutura;
- **Propriedades térmicas** – muitas das vezes pretende-se que o núcleo tenha a função de isolante e a transferência de calor seja mínima.

A Figura 21 indica o custo relativo em função da *performance* para diversos tipos de núcleo.

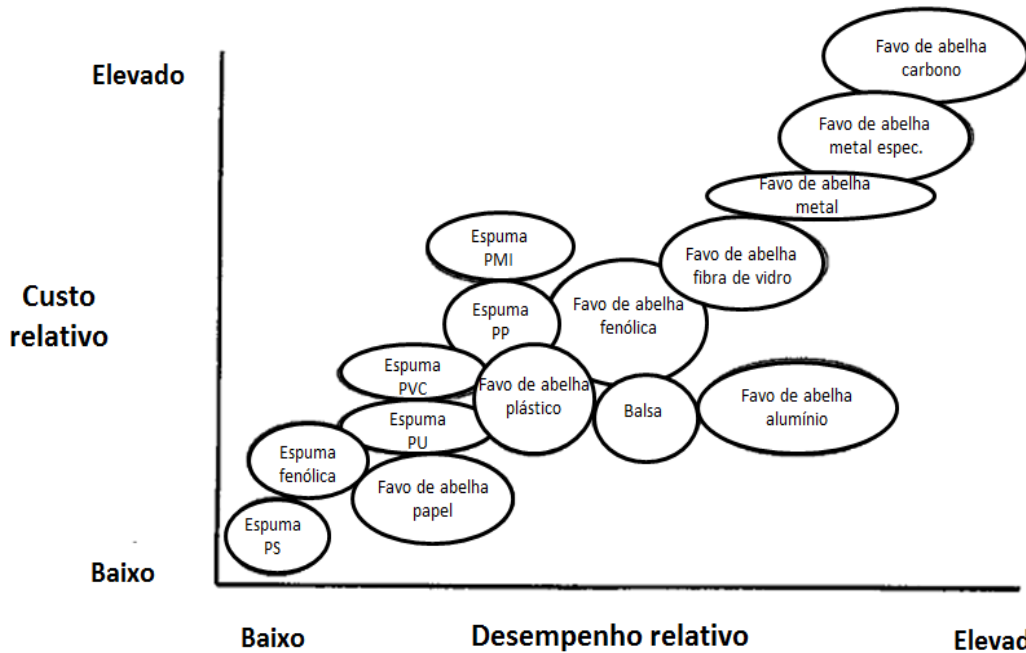


Figura 21 - Custo relativo em função do desempenho relativo para diversos tipos de núcleo (Campbell, 2004)

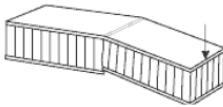
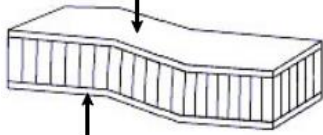
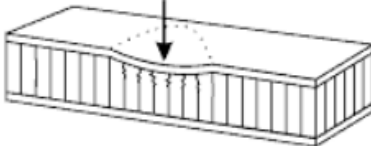

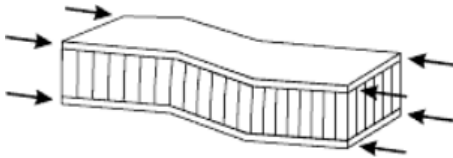
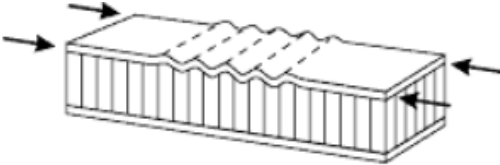
Verifica-se que os núcleos em favos de abelha são mais caros, no entanto também apresentam um desempenho superior. Isto justifica que a maioria das aplicações comerciais utilize núcleos de espumas poliméricas, enquanto que aplicações aeroespaciais exigem núcleos de favos de abelha, ainda que sejam mais caros.

O autocarro em estudo é o COBUS 3000, fabricado pela empresa CaetanoBus, S.A., sendo a sua carroçaria em alumínio. Um dos problemas reportados deste autocarro é o mau comportamento do alumínio quando sujeito a temperaturas muito baixas (-30°C). Este problema pode ser ultrapassado através da estrutura em sanduíche, uma vez que estas apresentam um **bom isolamento térmico**. No entanto, a condutividade térmica é também influenciada pela humidade uma vez que a água apresenta uma melhor condutividade térmica que o ar seco. Assim, quando a estrutura estiver sujeita a temperaturas muito baixas, como é o caso da utilização do autocarro nos países nórdicos, por exemplo, é necessário assegurar que a humidade não penetra no núcleo de espuma polimérica (Davies 2001).

3.5.2 Modos de falha

Existem vários modos de falha possíveis neste tipo de estrutura: falha das faces, falha por esforços transversos, esmagamento local do núcleo ou enrugamento. A Tabela 9 apresenta os principais modos de falha nas estruturas sanduíche e as respetivas causas.

Tabela 9 - Modos de falha das estruturas sanduíche (adaptado de (Broughton, 2002))

Modo de falha	Representação	Causa
Falha das faces		Espessura insuficiente ou resistência insuficiente das faces; pode ocorrer tanto à tração como à compressão
Falha por esforço transversal		A resistência ao corte do núcleo é insuficiente
Esmagamento local do núcleo		A resistência à compressão do núcleo é insuficiente
Enrugamento local		Espessura do painel insuficiente; resistência ao corte do núcleo insuficiente
Enrugamento geral		Pode surgir como consequência de um enrugamento local; a resistência ao corte do adesivo é demasiado baixa
Instabilidade local		Enrugamento intracelular que ocorre quando as faces são muito finas em relação ao tamanho da célula

3.6 Ligação a outros elementos, aberturas das janelas e acabamento

Nesta secção faz-se referência aos métodos de ligação possíveis em peças compósitas, uma vez que a carroçaria irá acoplar-se a outros elementos do autocarro como, por exemplo, o chassis. Para além disso, é ainda necessário referir a inclusão de portas e janelas, elementos integrantes da carroçaria do autocarro, e como poderão ser feitas as aberturas destinadas às mesmas. Por fim, é referido de que modo se pode aplicar os revestimentos de modo a ser possível obter um acabamento classe A através do processo PIMC – Revestimentos a pó em molde.

3.6.1 Métodos de ligação

A ligação da carroçaria a outros elementos poderá ser feita por dois tipos de ligação distintos:

- Ligações adesivas;
- Juntas mecânicas.

As ligações adesivas são as mais comuns no fabrico de produtos compósitos. Neste tipo de ligação, dois materiais são unidos por um adesivo. Quanto às juntas mecânicas, estas são similares às utilizadas em materiais metálicos, sendo utilizados parafusos ou rebites para a união dos materiais. Existe ainda a ligação por fusão; no entanto este tipo de ligação é utilizada apenas em materiais termoplásticos e, por essa razão, não é abordada neste trabalho.

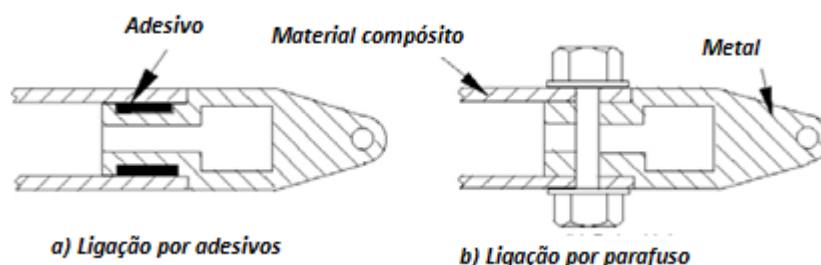


Figura 22 – Junção de uma peça compósita com uma peça metálica: a) ligação por adesivo, b) ligação por parafuso (adaptado de (Mazumdar, 2002))

Ligações adesivas

Nas ligações adesivas, dois materiais designados por substratos são unidos por meio de um adesivo. Existem vários tipos de ligações, no entanto a mais comum é a sobreposição simples, em que a carga é transferida de um substrato para o outro através de tensões de corte no adesivo. No entanto, neste tipo de sobreposição a carga encontra-se descentrada o que provoca uma flexão e leva ao aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo. A combinação das tensões normais com as tensões de corte leva a uma diminuição da resistência da junta e, para evitar este problema, muitas das vezes é utilizada a sobreposição dupla. A Tabela 10 apresenta as vantagens e desvantagens da união por adesivos.

Tabela 10 - Vantagens e desvantagens da união por adesivos (adaptado de (Mazumdar, 2002))

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • A carga na junta encontra-se distribuída por uma área em vez de estar concentrada num ponto, o que resulta numa distribuição de tensões uniforme; • Como a distribuição de tensões é uniforme, a junta apresenta um melhor desempenho em solicitações de fadiga e vibrações; • O acréscimo de peso à estrutura proveniente dos adesivos é desprezável, quando comparado com juntas mecânicas; • O adesivo não só une as duas superfícies como isola a junta, prevenindo assim a corrosão galvânica entre materiais diferentes; • É mais apropriada que as juntas mecânicas para a junção de superfícies irregulares; • Permite a obtenção de contornos suaves, o que adquire especial importância em formas aerodinâmicas e em aspetos estéticos; • Geralmente é mais económico e rápido quando comparado com as juntas mecânicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer preparação da superfície; • Pode ser necessário calor e pressão durante a operação de união, o que pode limitar o tamanho da peça se for necessário a cura num forno ou autoclave; • O tempo de cura de alguns adesivos é longo; • Difícil inspeção para verificação da qualidade da junta; • A união criada é definitiva, o que não permite montagens/desmontagens posteriores; • Exige um processo de controlo mais rigoroso que as juntas mecânicas.

Juntas mecânicas

As ligações aparafusadas são muito utilizadas em componentes metálicos. Este tipo de ligações utiliza parafusos, pinos ou rebites e geralmente requer uma sobreposição das peças a unir e um furo onde é inserido o parafuso ou rebite. A Tabela 11 apresenta as vantagens e desvantagens associadas a este tipo de ligações em sistemas compósitos.

Tabela 11 – Vantagens e desvantagens das juntas mecânicas (adaptado de (Mazumdar, 2002))

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Permitem montagens e desmontagens posteriores para reparações e manutenção; • Maior facilidade de inspeção e controlo de qualidade; • Não necessitam de preparação da superfície. 	<ul style="list-style-type: none"> • Adicionam peso à estrutura, minimizando assim o potencial de redução de peso dos sistemas compósitos; • Induzem concentração de tensões pois necessitam de furos; • São potenciais criadoras de corrosão galvânica em materiais distintos. Para evitar a corrosão galvânica é necessário revestir os parafusos/rebites com um material polimérico ou utilizar juntas mecânicas compósitas; • Criam descontinuidade das fibras no local onde é efetuado o furo.

3.6.2 Aberturas das janelas

Para o recorte das janelas poderá recorrer-se à técnica de *pinch-off*, que não é mais que um método de **redução da permeabilidade das fibras**. Esta técnica consiste em prender o reforço de fibra entre as metades do molde de forma a impedir o fluxo de resina no interior ou exterior da região que se pretende manter seca. A incorporação de insertos de borracha nas extremidades das região que se pretende manter seca melhora a operação e prolonga a vida da ferramenta.

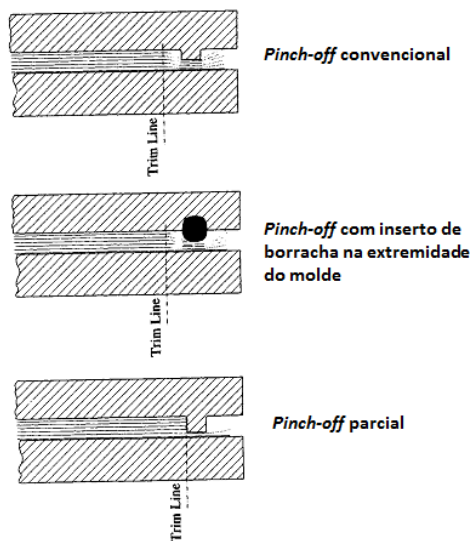


Figura 23 - Técnicas de *pinch-off* (adaptado de (Rudd et al., 1997))

Apesar desta técnica ser relativamente simples e efetiva no controlo da dispersão de resina apresenta algumas desvantagens como, por exemplo, a **possibilidade de danificação da superfície** do molde devido à natureza abrasiva de algumas fibras, como é o caso da fibra de vidro do tipo E. Outra desvantagem é a **necessidade de operações de corte posteriores** para remover os excessos de fibra. Para além disso, a zona sujeita à operação de corte das fibras constitui uma fonte de potencial **degradação**, uma vez que as fibras ficam expostas ao meio ambiente sem qualquer tipo de proteção (Rudd et al., 1997).

3.6.3 Acabamento

É possível obter um acabamento classe A em peças em compósitos através do **processo PIMC** – Revestimentos a pó em molde. O PIMC é uma técnica que, quando integrada com outros processos de produção tal como o RTM, por exemplo, é capaz de produzir **acabamentos de alta qualidade** em compósitos reforçados com fibra de vidro ou fibra de carbono. Se a peça for fabricada através do processo RTM, o princípio de fabrico é o mesmo com a exceção que antes de se inserir a pré-forma no molde este é revestido com o pó do PIMC. Durante a cura, o pó do revestimento e a resina curam ao mesmo, resultando daqui uma forte ligação química e adesão interfacial. Quando a peça é retirada do molde apresenta uma **superfície suave e sem porosidades**, preparada para ser revestida com o acabamento superficial da Classe A. A Figura 24 ilustra este processo.

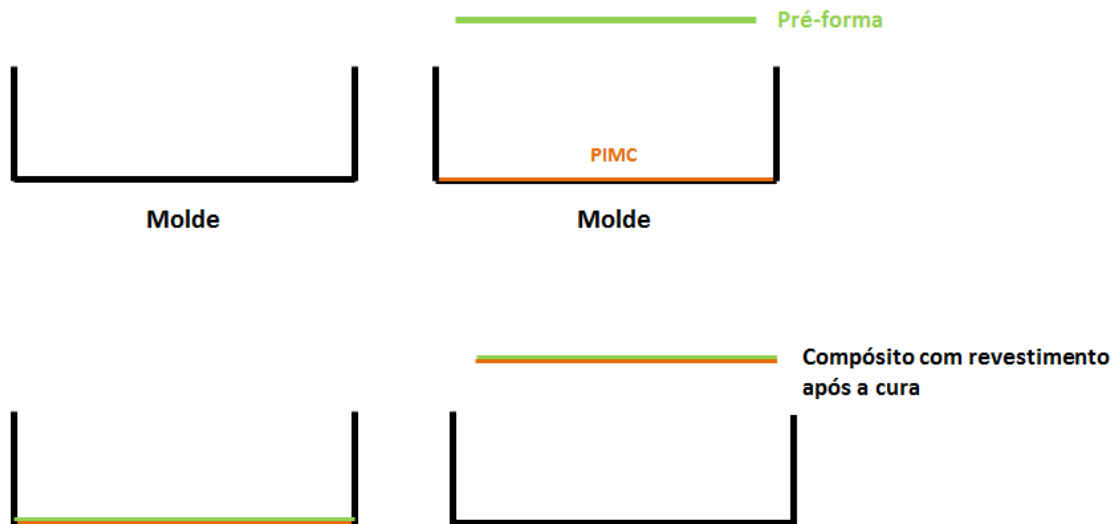


Figura 24 - Representação da aplicação do PIMC

Uma outra vantagem da aplicação do PIMC é que elimina a necessidade de preparação da superfície (lixamento, polimento), permitindo assim uma **redução dos tempos de produção** (Valero et al., 2014). Para além disso, o processo é facilmente automatizável através de pistolas de projeção programadas para funcionar entre determinados períodos de tempo, reduzindo assim a mão-de-obra necessária e os tempos de ciclo de produção.

3.7 Inspeção e estratégias de reparação

Uma vez que falhas são sempre suscetíveis de ocorrer, nesta secção faz-se referência a algumas estratégias de inspeção e reparação. A Figura 25 apresenta as falhas mais prováveis de acontecer em peças compósitas, consoante a fase de fabrico.

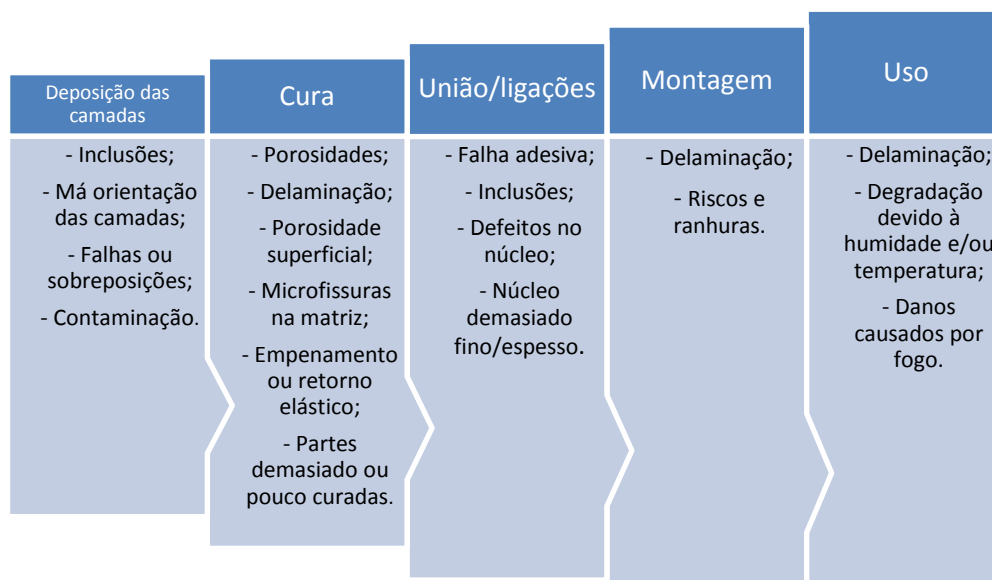


Figura 25 – Potenciais falhas em peças compósitas consoante a fase de fabrico e uso (adaptado de (Campbell, 2004))

Como é possível verificar, a **delaminação** é o maior problema associado às peças compósitas. Este fenómeno afeta as propriedades mecânicas e estruturais da peça e dependendo da sua extensão pode ser necessário a reparação ou substituição da peça. No caso em estudo, uma carroçaria, interessam apenas técnicas de inspeção que sejam não destrutivas. Apresentam-se assim algumas técnicas de inspeção não destrutiva, que permitem avaliar qual o dano que a carroçaria sofreu ou qual o desgaste a que está sujeito no decorrer do tempo.

3.7.1 Inspeção não destrutiva

A inspeção não destrutiva é um método utilizado para inspecionar partes e montagens unidas por adesivos para verificar que não existem defeitos que sejam grandes o suficiente ou que estejam localizados em áreas críticas e que possam levar à falha da peça quando em serviço. Os métodos de inspeção não destrutiva podem ser desde uma simples inspeção visual até sistemas de automação sofisticados com grande capacidade de processamento (Campbell, 2004).

Inspeção visual

A inspeção visual é um método extremamente utilizado, no entanto é bastante limitado uma vez que só deteta defeitos superficiais. Esta inspeção é a mais simples, devendo-se submeter a estrutura a revisões periódicas, procurando por fendas, depressões, porosidades ou descolorações (Campbell, 2004).

Teste de batimento ("tap test")

O teste de batimento é um método de inspeção que consiste em avaliar a vibração do compósito quando sujeito a um batimento com um determinado objeto, e é muitas das vezes combinado com a inspeção visual. A vibração produzida determina o estado do material, sendo que se este estiver danificado o som irá ressoar de forma diferente, ou seja, noutra frequência. Apesar deste método ser eficaz numa fase preliminar de deteção de danos, recomenda-se a utilização de equipamento ultrasónico para determinar a grandeza dos mesmos (Campbell, 2004).

Inspeção ultrasónica

A inspeção ultrasónica é o método mais valioso para a inspeção de peças compósitos, e funciona segundo o princípio de ondas de som transmitidas e refletidas. A inspeção ultrasónica é geralmente definida na faixa de frequência de 1-30 MHz, no entanto a maior parte das estruturas compósitas são testadas na faixa dos 1-5 MHz, pois apesar das altas frequências serem mais sensíveis a defeitos, as baixas frequências conseguem atingir uma maior profundidade. Um avanço relativamente recente na inspeção ultrasónica é a utilização de laser ultrasónicos. Esta tecnologia transmite a mesma informação que a inspeção ultrasónica convencional, no entanto de uma maneira mais rápida (Campbell, 2004).

Inspeção radiográfica

Este tipo de inspeção é geralmente utilizado para detetar microfissuras nos compósitos laminados e defeitos nas estruturas favos de abelha como esmagamento do núcleo, por exemplo. Na inspeção radiográfica, a peça é exposta a radiação raios-x, que penetram na peça e reproduzem um filme com o resultado das diferentes absorções dos raios, devido à presença de defeitos (Campbell, 2004).

Inspeção termográfica

Apesar de não ser tão utilizada como a inspeção radiográfica, a inspeção termográfica é um método relativamente rápido e que permite cobrir uma grande área da peça a ser inspecionada. É utilizada para detetar delaminações, danos de impacto ou infiltrações de água. Este tipo de inspeção baseia-se no princípio de que os defeitos causam diferenças na condução de calor, aquecendo-se assim a superfície da peça uniformemente e deixando-se de seguida arrefecer. Caso existam defeitos, estes serão detetados devido às diferenças registadas na taxa de arrefecimento. Todo este processo é monitorizado por uma câmara de infravermelhos que regista a radiação da superfície (Campbell, 2004).

3.7.2 Estratégias de reparação

No caso das estratégias de reparação, estas podem ser classificadas como enchimento, injeção, aparafusamento ou adesivas. Nas reparações por enchimento utilizam-se pastas adesivas para reparar danos não estruturais enquanto que nas reparações por injeção se utilizam adesivos de baixa viscosidade que são injetados nas zonas delaminadas ou nas falhas

adesivas. As reparações por aparafusamento são geralmente efetuadas em compósitos de elevada espessura e sob carregamentos elevados, e as reparações adesivas utilizam-se em compósitos de camadas finas. Este último tipo de reparação é o mais difícil e o mais propenso a erros. Neste tipo de reparação, são utilizados pré-impregnados ou folhas de titânio (nalguns casos) que são unidas umas às outras em camadas por meio de um adesivo, exigindo remoções de material e operações de maquinagem (Campbell, 2004).

4. A METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

4.1 Introdução

O caminho para o desenvolvimento sustentável requer métodos e ferramentas para medir e comparar os impactos ambientais da atividade humana relativos à produção de bens e serviços. Os impactos ambientais são resultados do consumo de recursos e emissões (líquidas, gasosas ou sólidas) no ambiente. Estes decorrem durante as atividades associadas às várias etapas do ciclo de vida de um determinado produto, designadamente, extração de matérias-primas, produção de materiais, fabricação e uso dos produtos e fim de vida dos mesmos (reciclagem, reutilização, incineração). Estes consumos e emissões poderão traduzir-se numa diversidade de impactos ambientais, tais como alterações climáticas, destruição da camada de ozono, a produção de nevoeiro fotoquímico (*smog*), eutrofização, acidificação e escassez de recursos bem como problemas para a saúde humana.

A **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)** é uma metodologia que tem como objetivo avaliar o impacto ambiental de um determinado produto ou serviço ao longo de todo o seu ciclo de vida, permitindo assim identificar oportunidades para a redução da poluição e redução do consumo de recursos. Os princípios associados à ACV encontram-se definidos na série de normas ISO 14040 (NP EN ISO 14040:2008).

As atividades consideradas num estudo de ACV incluem conceção e desenvolvimento do produto, extração de recursos, produção de materiais e fabrico dos produtos, utilização e consumo e, por fim, atividades de fim de vida. A Figura 26 apresenta o exemplo de um ciclo de vida de um produto fabricado em compósitos.

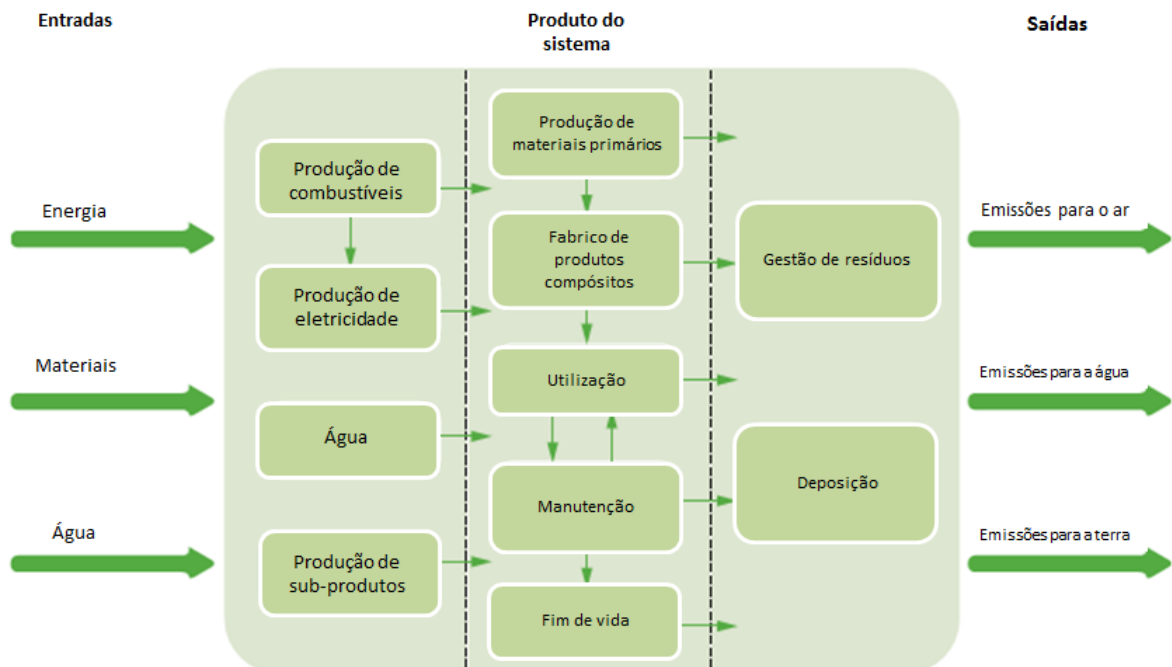


Figura 26 - Representação do ciclo de vida e das entradas e saídas dos materiais e energia associados a um produto composto por sistemas compósitos (adaptado de (Anderson et al., 2004))

A maior parte dos estudos excluí a fase de conceção e desenvolvimento do produto assumindo que esta não tem uma contribuição significativa para o impacto ambiental. No entanto, é importante referir que decisões tomadas na fase de *design* influenciam os impactos associados a outras fases do ciclo de vida, uma vez que o *design* de um produto determina o seu comportamento nas fases seguintes. Assim, se o objetivo da ACV for a melhoria de um determinado produto, o estudo deverá ser iniciado logo na fase de conceção de forma a avaliar outras alternativas possíveis no que se refere, por exemplo, ao *design* ou aos materiais utilizados (Rebitzer et al., 2004).

Os estudos de ACV completos necessitam de vários recursos (financeiros, humanos, temporais), o que na prática implica que muitas das vezes sejam necessárias fazer simplificações ao longo do estudo. Existem algumas **limitações** na metodologia que se resumem em seguida (Guinée, 2004) (NP EN ISO 14040:2008):

- Não fornece qualquer tipo de informação sobre os impactos locais;
- Foca-se apenas no aspeto ambiental, não fazendo qualquer tipo de referência aos impactos sociais ou económicos;
- A natureza das escolhas e suposições efetuadas pode ser subjetiva;
- Dificuldade em obter dados fiáveis relativamente a muitos dos processos.

4.2 Metodologia

A metodologia da ACV inclui, de acordo com a norma NP EN ISO 14040:2008, quatro etapas principais, incluindo:

1. Definição do objetivo e do âmbito da análise;
2. Inventário;
3. Avaliação dos impactos ambientais;
4. Interpretação dos resultados.

A Figura 27 apresenta as **principais etapas de uma avaliação do ciclo de vida**, sendo possível verificar que existem interações constantes entre a interpretação e as outras etapas. Este processo verifica-se uma vez que a avaliação é efetuada de acordo com os objetivos inicialmente traçados e vai sendo refinada ao longo de todo o processo. Esta interação permite que, em conjunto, todas as etapas contribuam para dar uma resposta em termos de impacto ambiental aos objetivos e âmbito que melhor expressam o ciclo de vida de um determinado produto.

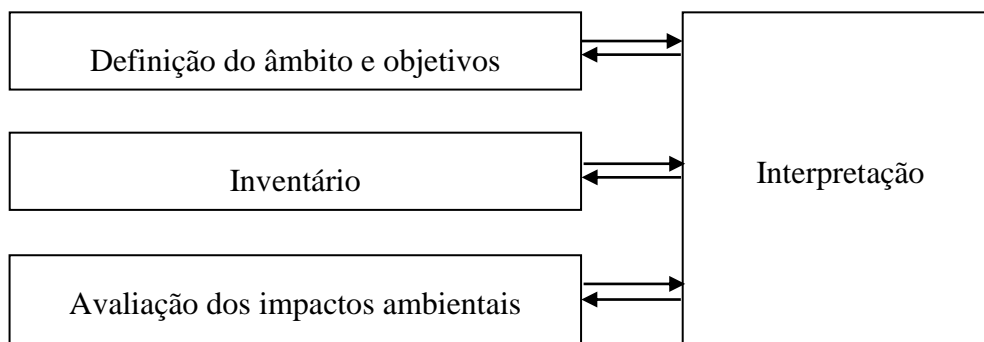


Figura 27 – Etapas da metodologia de avaliação do ciclo de vida (NP EN ISO 14040:2008)

4.2.1 Definição do objetivo e âmbito

A primeira etapa da avaliação do ciclo de vida de um produto consiste na definição clara do objetivo do estudo e do motivo para a realização do mesmo. Na definição do âmbito são identificadas as fronteiras do estudo que incluem as atividades que formam parte dos processos que ocorrem ao longo do ciclo de vida do produto.

Aqui é também introduzido o conceito de unidade funcional. A unidade funcional responde à necessidade de quantificação da função do produto em estudo, para caracterizar o seu desempenho ao executar a função que lhe está associada, constituindo uma referência, em relação à qual se realizará a etapa seguinte de inventário (Ferrão,2009). A unidade funcional descreve e possibilita a quantificação das funções primárias associadas ao sistema do produto. No caso da avaliação do ciclo de vida especificamente associada a um autocarro, a unidade funcional que é selecionada em função do objetivo em estudo poderá ser, por exemplo, “um número de quilómetros percorridos por número de passageiros transportados” ou “o tempo de vida do autocarro”.

No caso de um estudo comparativo entre dois produtos, este só faz sentido entre sistemas que tenham funções idênticas. Nestes casos os resultados da ACV são comparados com base na mesma unidade funcional.

4.2.2 Inventário

Na etapa de inventário são compiladas as quantidades de recursos necessários e energia consumida e produzidas bem como emissões (líquidas, sólidas e gasosas) ao longo da vida do produto. Para a realização desta tarefa é esquematizado o diagrama de processos do sistema (sistema do produto), recolhida a informação e analisada a sua qualidade, sendo os dados processados e reportados à unidade funcional. Por último são analisados os resultados que podem induzir a necessidade de redefinição das fronteiras do sistema.

O modelo do sistema do produto é constituído por processos unitários que representam as diversas atividades inerentes ao ciclo de vida tais como processos de fabrico, transporte e distribuição. Para cada processo unitário, são registados os recursos naturais utilizados, as emissões e fluxos de resíduos e outras alterações ambientais que possam estar presentes.

Na realização de um estudo de ACV são tecidas algumas considerações. As escolhas e suposições efetuadas durante a modelização do sistema, principalmente as que dizem respeito

às fronteiras do sistema e aos processos unitários escolhidos, são bastante relevantes para os resultados da avaliação do ciclo de vida, uma vez que, em termos práticos, não existem dados nem recursos para conduzir um estudo absolutamente completo. Nalgumas situações é necessário decidir quais os processos que são modelados pelo estudo e quais as emissões para o meio ambiente que são consideradas, bem como os consumos energéticos que serão avaliados e com que pormenor (Rebitzer et al., 2004) (Ferrão,2009). A Figura 28 representa o exemplo de um estudo onde são identificadas as fronteiras de um sistema, indicando também os fluxos de entrada e de saída.

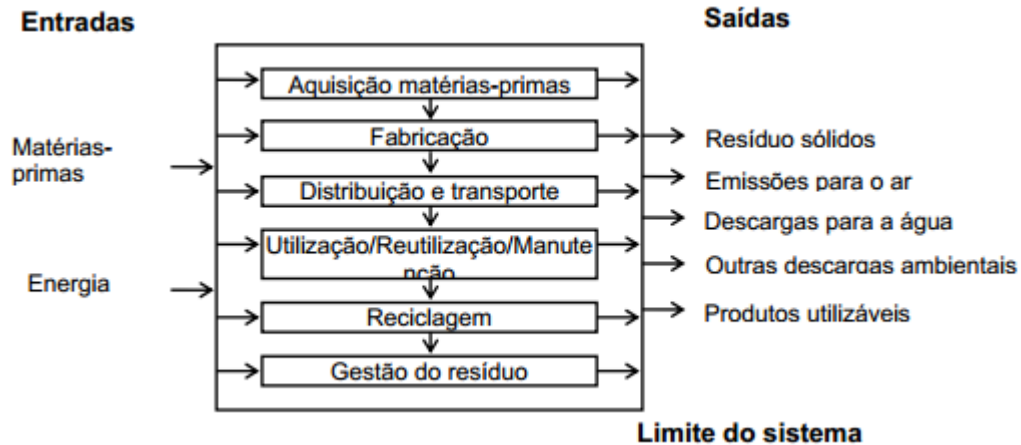


Figura 28 – Exemplo de definição das fronteiras do sistema (Vigon et al., 1994)

4.2.3 Avaliação dos impactos ambientais

A etapa da avaliação do impacto ambiental inclui os passos de Classificação, Caracterização, Normalização e Ponderação. Na **Classificação** são selecionadas as categorias do impacto ambiental e o método de avaliação a utilizar. Na **Caracterização** são calculados os contributos das diversas intervenções ambientais para cada categoria do impacto ambiental, através de fatores de caracterização. Durante a **Normalização**, os valores obtidos na fase de Caracterização são divididos por valores de referência geográfica para cada categoria de impacto ambiental. Finalmente, a **Ponderação** agrega as categorias do impacto ambiental num indicador único usando fatores de ponderação para cada uma das categorias de impacto ambiental.

Apenas as fases de Classificação e de Caracterização são obrigatórias, enquanto as fases de Normalização e Ponderação são opcionais. A Figura 29 apresenta os passos da etapa de avaliação dos impactos ambientais, indicando quais os obrigatórios e quais os opcionais.

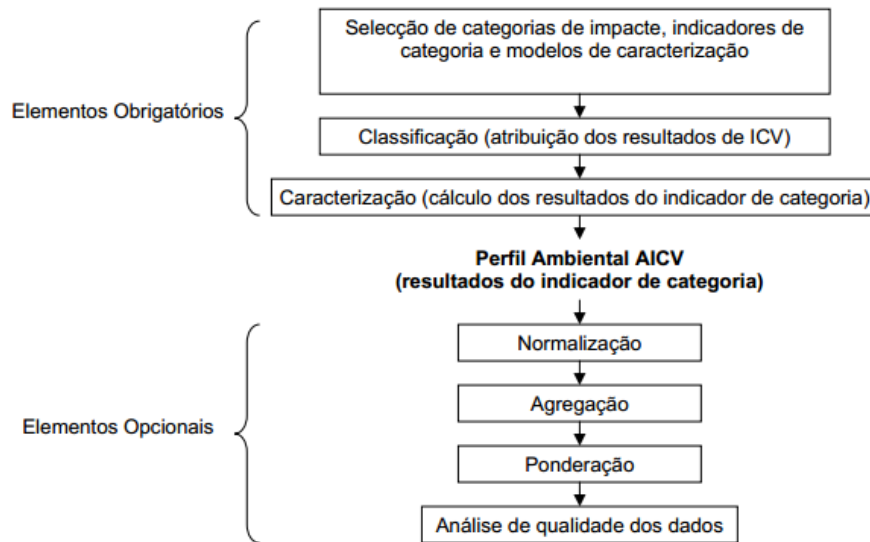


Figura 29 – Passos obrigatórios e opcionais para a etapa de avaliação dos impactos ambientais (adaptado de (Pennington et al., 2004))

4.2.4 Interpretação

A interpretação ocorre em cada uma das etapas da metodologia. A interpretação realizada em cada etapa permite que os resultados obtidos sejam confrontados com o objetivo inicialmente proposto e permite também alargar ou restringir o inventário ou a metodologia usada de modo a que os resultados sejam transparentes e adequados ao objetivo proposto. No que diz respeito aos estudos comparativos, se um dos produtos apresenta um maior consumo de materiais e de recursos que o outro, então uma interpretação com base no inventário do ciclo de vida pode ser realizada. Neste caso não são avaliados os impactos ambientais e as conclusões retiradas são apenas qualitativas.

PARTE II – TRABALHO REALIZADO

5. MATERIAIS E TECNOLOGIAS DE FABRICO

Neste estudo serão avaliados os impactos ambientais associados ao módulo de uma carroçaria de autocarro feita em estrutura sanduíche de sistemas compósitos e de uma carroçaria em alumínio. Será também efetuada uma otimização da estrutura em sistemas compósitos, através da modelização em elementos finitos, recorrendo-se para isso ao *software* Abaqus/CAE. A carroçaria compósita é obtida através do enrolamento filamentar a seco dando origem a uma pré-forma que é em seguida impregnada segundo o processo RTM – Moldação por Transferência de Resina. Antes de se proceder à avaliação do ciclo de vida e às simulações numéricas, considera-se importante referir quais as razões que levaram à escolha destes materiais e processos bem como descrever as carroçarias que são análise de estudo.

5.1 Seleção dos materiais

Os materiais escolhidos para a carroçaria compósita foram a fibra de vidro do tipo E e a resina de poliéster isoftálica não saturada, sendo que esta escolha se prende fundamentalmente em razões económicas. A opção de se utilizar fibra de carbono, material que apresenta propriedades mecânicas superiores às da fibra de vidro e é muito utilizado na construção de peças compósitas de alto desempenho, foi desconsiderada uma vez que a sua relação custo-propriedades não compensa para este tipo de aplicação. Relativamente à resina escolhida, a resina de poliéster, as suas propriedades face ao seu preço fundamentam esta escolha, sendo que se fosse selecionada uma resina de epóxico, material que também é bastante utilizado na construção de peças compósitas de alto desempenho, não se iria verificar uma grande vantagem na melhoria das propriedades mecânicas. A Figura 30 e a Figura 31 apresentam a rigidez e a resistência específicas, respetivamente, para as fibras e resinas consideradas. Estes gráficos foram obtidos com recurso ao *software* CES EduPack (GrantaDesign, 2013), tendo-se optado por manter a designação dos materiais em inglês, tal como aparece no programa.

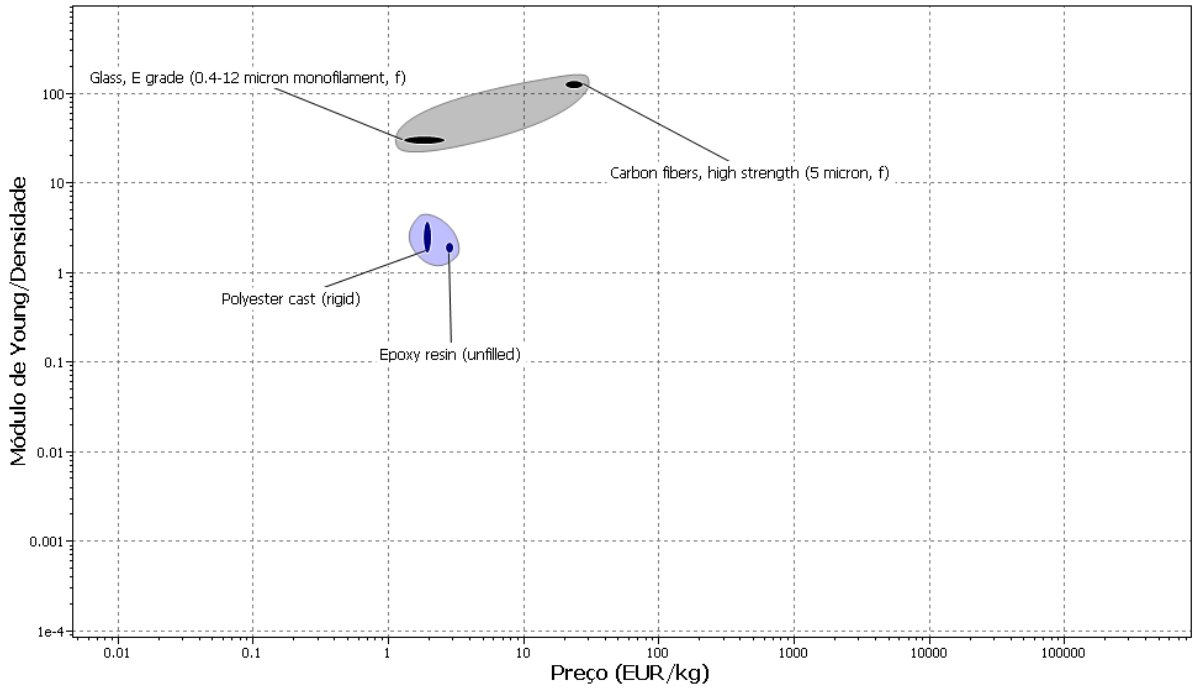


Figura 30– Rigidez específica (Módulo de Young (GPa)/Densidade (kg/m³) em função do preço (€/kg)), para os materiais seleccionados (CES EduPack)

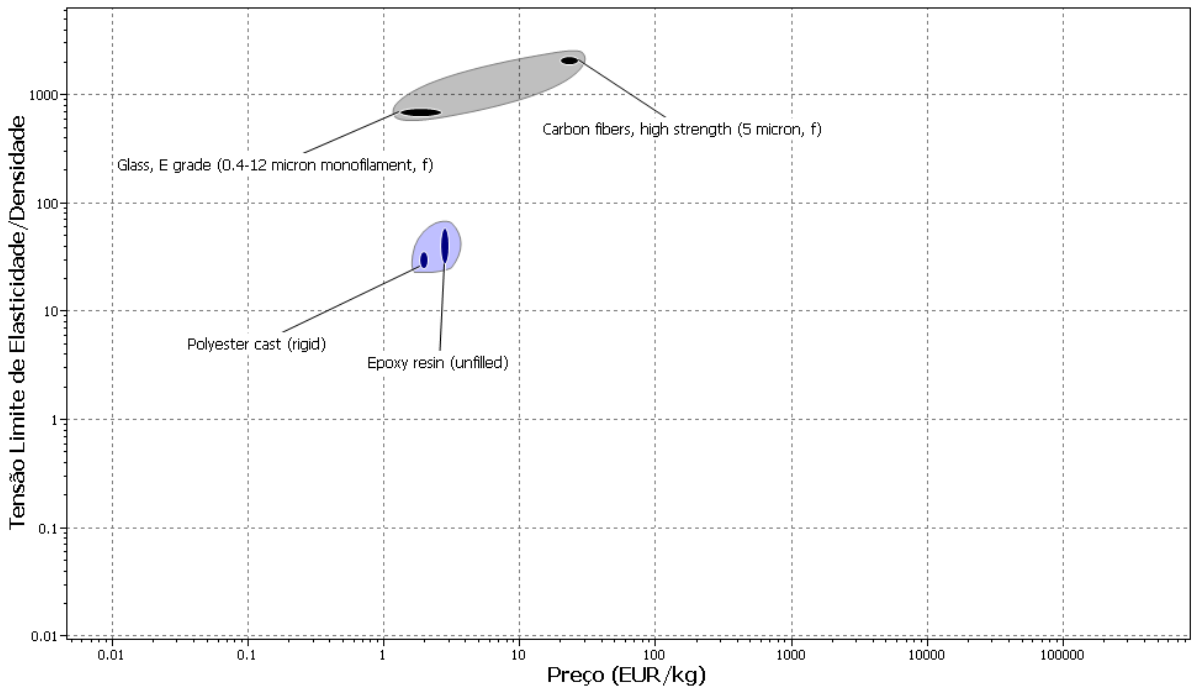


Figura 31 - Resistência específica (Tensão Limite de Elasticidade (MPa)/Densidade (kg/m³) em função do preço (€/kg), para os materiais seleccionados (CES EduPack)

Relativamente às fibras, verifica-se que a fibra de vidro apresenta uma rigidez e resistência específicas inferiores à fibra de carbono. Contudo, o custo superior da fibra de carbono não compensa a melhoria das propriedades que se obtêm com a fibra de vidro. A Tabela 12 apresenta os valores de rigidez específica, resistência específica e o preço por quilo da fibra de vidro e da fibra de carbono. Verifica-se que o valor do preço por quilo da fibra de carbono é cerca de 11 vezes superior à fibra de vidro, mas a sua rigidez e resistência específicas são apenas cerca de 4 vezes superiores.

Tabela 12 - Rigidez específica, resistência específica e preço (€/kg) da fibra de vidro e da fibra de carbono (GrantaDesign, 2013)

	Fibra de vidro do tipo E	Fibra de carbono
ρ (kg/m ³)	2600	1800
E (GPa)	79	235
σ_e (MPa)	1,85x10 ³	4,6x10 ³
Rigidez específica (E/ρ)	30	130,5
Resistência específica (σ_e/ρ)	711,5	2666
Preço (€/kg)*	1,9	23

*Nota: Preço médio, estimado a partir dos valores obtidos no programa CES EduPack

Relativamente às resinas selecionadas, resina de poliéster e resina de epóxico, verifica-se que estas apresentam uma rigidez e resistência específica semelhantes. No entanto, o preço por quilo da resina de epóxico é mais elevado. Fundamenta-se assim a escolha de uma resina de poliéster não saturada ao invés de uma resina de epóxico.

O programa CES EduPack permite ainda fazer uma análise do ponto de vista ambiental, através das quantidades de dióxido de carbono libertadas na produção dos materiais. Esta análise permite também justificar a escolha dos materiais selecionados. A Figura 32 apresenta os quilogramas de dióxido de carbono libertados para a atmosfera por cada quilo de produção de matéria-prima.

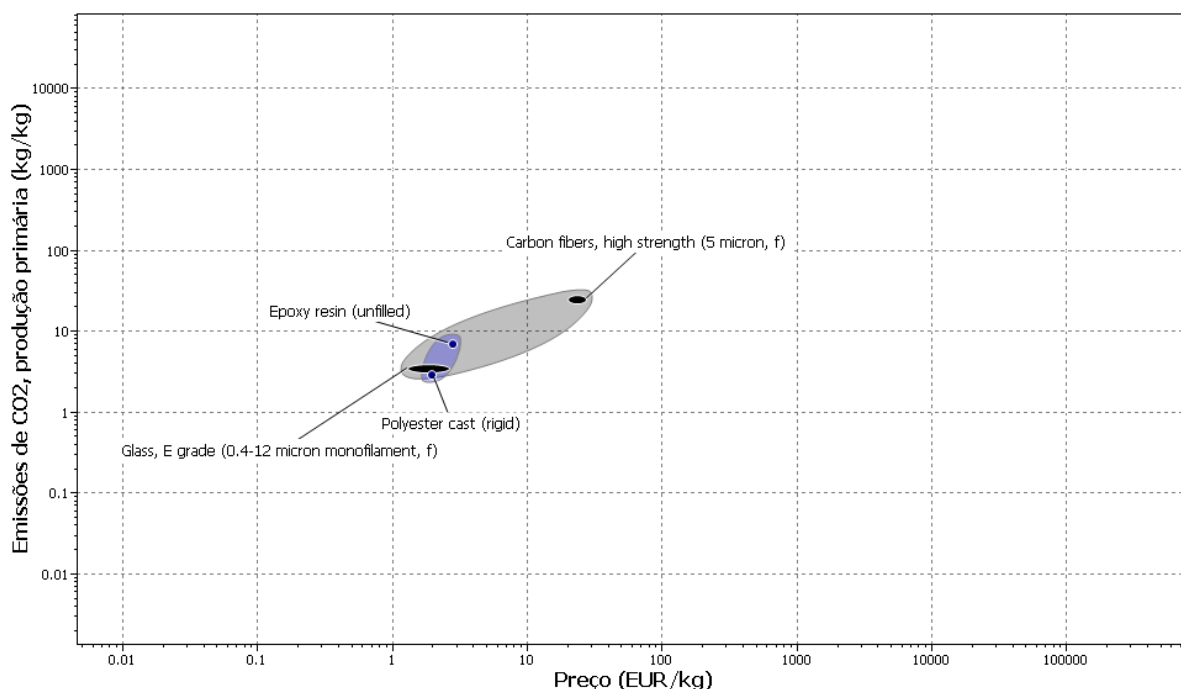


Figura 32 - Emissões de CO₂ na produção primária (kg/kg) em função do preço (€/kg), para os materiais selecionados (CES EduPack)

Verifica-se que os materiais escolhidos, a fibra de vidro e a resina de poliéster não saturada, são os que apresentam uma menor quantidade de emissões de dióxido de carbono, por cada quilo de matéria-prima produzida, sendo também os materiais mais baratos.

5.2 Seleção dos processos de fabrico

Os processos de fabrico selecionados para a carroçaria compósita foram o enrolamento filamentar e o RTM, considerando-se que a maior vantagem da qual se pode tirar proveito para o fabrico da carroçaria é o enrolamento a seco das fibras. A realização do enrolamento filamentar a seco permite que posteriormente seja realizada a técnica de *pinch-off*, sendo assim possível **selecionar quais as zonas que se pretende impregnar** e quais as zonas que se pretende manter secas. Isto adquire especial importância nas aberturas destinadas às portas e janelas do autocarro, sendo que **as fibras recortadas poderão ser reaproveitadas** para outras utilizações uma vez que não foram impregnadas. O enrolamento a seco permite também a obtenção de uma pré-forma. A pré-forma apresenta uma **forma já muito próxima da final** e, através do enrolamento a seco, é possível ser obtida de forma altamente automatizável. Além disso, o enrolamento filamentar permite a obtenção de uma **peça única**, obtida através da deposição exata e repetitiva de filamentos contínuos que podem ser orientados consoante a direção do carregamento, o que permite uma maior integração de componentes, eliminando assim a necessidade de mão-de-obra associada à montagem de componentes das estruturas tradicionais e, conseqüentemente, diminuindo os tempos de produção. O objetivo é produzir uma estrutura do tipo sanduíche, em que todos os componentes e perfis constituintes de uma estrutura tradicionalmente em alumínio sejam incorporados numa única peça.

Por fim, os processos escolhidos apresentam ainda as vantagens associadas aos processos fora-de-autoclave: para o fabrico de uma peça com as mesmas dimensões são mais **baratos** e permitem uma **redução do consumo de energia**.

5.3 Abordagem modular

O fabrico de uma estrutura única permite um grande volume de produção e uma redução dos tempos de fabrico, mas apresenta pouca flexibilidade na construção. A modularização, pelo contrário, permite uma **maior flexibilidade** na construção, uma vez que permite a combinação de vários módulos, de modo a satisfazer as necessidades do cliente (número de portas desejadas, colocação ou não de ar condicionado, por exemplo). A grande vantagem que se pode tirar da modularização é, portanto, o **elevado grau de personalização** do produto, através de diferentes combinações dos módulos. Outra das vantagens da modularização é que, em caso de acidente ou dano, **permite a substituição da parte danificada** (neste caso, do seu módulo), ao invés da substituição ou reparação da carroçaria completa.

A abordagem modular concentra-se apenas no setor central da carroçaria, mantendo a sua frente e traseira originais, uma vez que esta já é a estratégia levada a cabo pela CaetanoBus, S.A. Os módulos deverão ser multifuncionais e de iguais dimensões, considerando-se assim 3 módulos para a secção central:

- Módulo com inclusão de janela e ar condicionado;
- Módulo com inclusão de janela sem ar condicionado;
- Módulo com inclusão de porta;

O módulo selecionado para a avaliação do ciclo de vida é um módulo com inclusão de janela e calhas para o ar condicionado, com 1,85 metros de comprimento, 2,5 metros de altura e 3 metros de largura. A escolha deste módulo prende-se no facto de esta ser a secção mais pesada da carroçaria. A Figura 33 pretende representar de forma genérica e simplificada a secção escolhida.

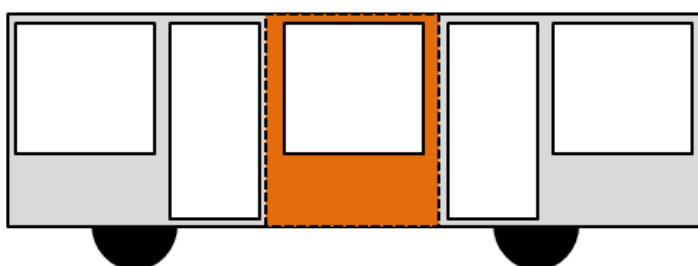


Figura 33 - Representação simplificada do módulo escolhido para a avaliação do ciclo de vida

5.3.1 Descrição dos módulos

COBUS

O COBUS é um autocarro fabricado pela empresa CaetanoBus, S.A., sendo um autocarro utilizado em aeroportos. A sua carroçaria tem 13 metros de comprimento, 3 de largura e 2,5 de altura, sendo a sua massa, em vazio, de 12 toneladas. A Figura 34 apresenta o modelo COBUS.



Figura 34 - Modelo COBUS

Uma vez que este é um autocarro para ser utilizado em aeroportos não se encontra homologado, sendo que o único teste efetuado é o teste de travagem. O único teste efetuado é o teste de travagem. A Tabela 13 apresenta as restantes informações disponibilizadas sobre o COBUS.

Tabela 13 - Informações disponibilizadas sobre o modelo COBUS

Horas de funcionamento/Ano (h)	4380
Quilómetros percorridos/Ano (km)	29200
Consumo de combustível (<i>diesel</i>) (l/100km)	40
Consumo de energia (kWh/km)	1,5

O COBUS é constituído por uma estrutura de alumínio que assenta num chassis em aço, sendo que o piso é também constituído por painéis de alumínio. O alumínio utilizado é o Al 6106-T6 (ver Anexo B1: Ficha técnica Al 6106-T6), que pode apresentar-se no estado fundido ou extrudido, dependendo do componente. A Tabela 14 apresenta a composição química deste material.

Tabela 14 - Composição química (%) do alumínio 6106

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
EN AW-6106	0,3-0,6	0,35	0,25	0,05-0,2	0,4-0,8	0,20	0,10

A Tabela 15 apresenta algumas das suas propriedades mecânicas.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas do alumínio 6106

ρ (kg/m ³)	E (GPa)	Tensão de rotura mín. (MPa)	Dureza (HB)	Alongamento (%)
2700	69,5	250	75	8

Descreve-se em seguida o processo associado à produção do alumínio, sendo que a Figura 35 apresenta os principais passos associados a esta.

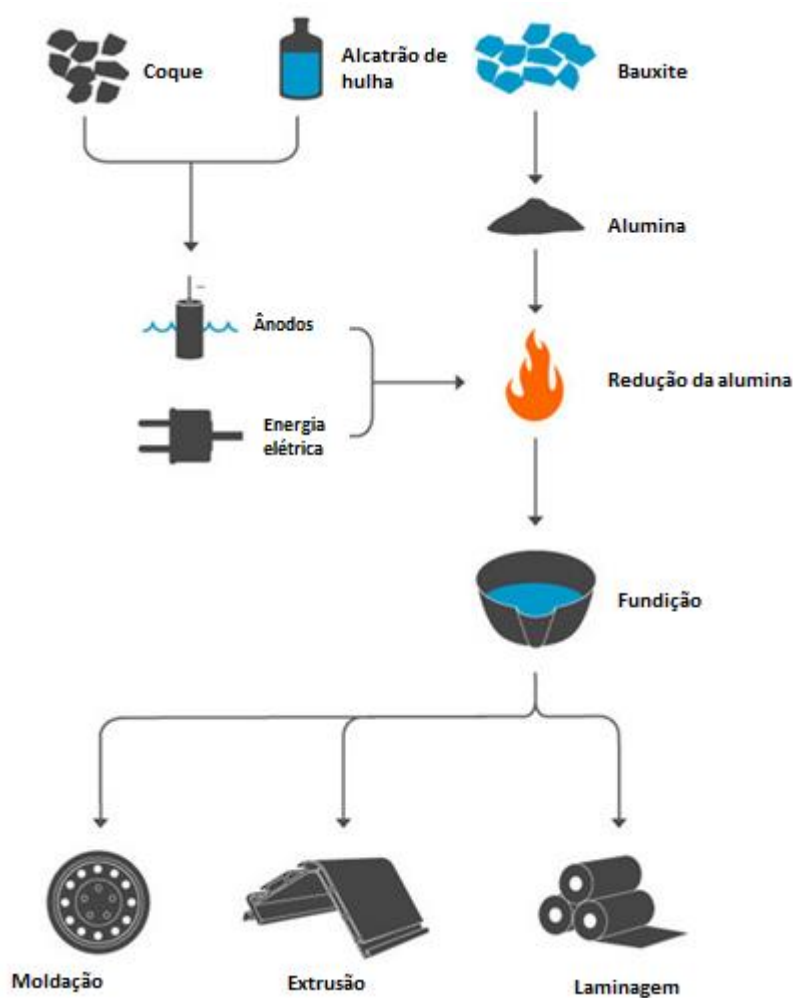


Figura 35 - Principais etapas do processo de produção de alumínio (adaptado de (Hydro, 2013))

Para a produção de alumínio, três matérias-primas são necessárias: óxido de alumínio (alumina), eletricidade e carvão. A alumina é convertida em alumínio através de um processo eletrolítico. Neste processo, uma corrente de energia elétrica atravessa um cátodo negativo e um ânodo positivo, sendo que o ânodo é consumido no processo pois reage com o oxigénio presente na alumina formando dióxido de carbono. O produto resultante deste processo é alumínio puro no estado líquido, que depois pode ser moldado, extrudido ou laminado. No processo de extrusão, o alumínio é forçado através de uma matriz com a forma do perfil desejado. É assim possível obter diversos perfis com diferentes secções transversais. No processo de moldação, o alumínio no seu estado fundido é depositado sobre um molde que apresenta a forma desejada, sendo que após solidificação a peça é retirada do molde.

O módulo do COBUS apresenta um total de 398 componentes, não considerando a fixação do ar condicionado (Ver Anexo A1: Lista de componentes do módulo COBUS) e uma massa total de 402,3 kg, sem considerar a massa das janelas. Desta massa total, 284,1 kg correspondem a alumínio extrudido, e 55,1 kg correspondem a alumínio fundido. A restante massa diz respeito a pequenos componentes em aço, tais como parafusos, e aos revestimentos que podem ser em borracha, laminite ou ABS. Os revestimentos em borracha têm como função revestir os painéis do chão e os revestimentos em laminite têm como função revestir a estrutura em alumínio, sendo a sua utilização meramente estética. Os revestimentos em ABS têm a função de ocultar os cabos elétricos que atravessam o autocarro.

São ainda conhecidos os consumos de energia (gás natural, gasóleo e eletricidade) nas instalações da CaetanoBus, S.A., associados à produção de um módulo COBUS, no ano de 2013. O gás natural é utilizado para o aquecimento de pavilhões e estufas de pintura, o gasóleo é utilizado na entrega de produtos ao cliente e em provas de testes e a energia elétrica é utilizada no acionamento de diversos equipamentos tais como motores, ventiladores, bombas e iluminação. A Tabela 16 apresenta os consumos de gás natural e de energia elétrica para o módulo COBUS, em kgep e em m³ para o gás natural e gasóleo, e em kgep e em kWh para a energia elétrica, para o seu ciclo de produção. Estes valores foram fornecidos pela empresa CaetanoBus, S.A. Os fatores de conversão utilizados foram 0,82 tep/10³m³ para o gás natural, 0,872 tep/m³ para o gasóleo e 0,29 kgep/kWh para a energia elétrica (Parente, 2008).

Tabela 16 – Consumo de gás natural, gasóleo e de energia elétrica para o módulo COBUS para o seu ciclo de produção, em 2013

Fonte energética	Unidade		
	kgep	kWh	m ³
Gás natural	262	-	319,5
Gasóleo	24,9	-	0,03
Energia elétrica	181,7	626,6	-

FEUPBUS

A carroçaria em sistemas compósitos tem 8,6 metros de comprimento, 2,5 metros de largura e 2,6 metros de altura. Esta carroçaria é considerada uma estrutura monocoque, ou seja, a carroçaria e o piso são uma única peça que assenta sobre o chassis de um autocarro da marca Volvo e do modelo B10M. O conceito deste autocarro é apresentado na seguinte figura:



Figura 36 - Desenho virtual do FEUPBUS (Almeida, 2013)

O FEUPBUS foi projetado para ser um veículo de circulação urbana e, como tal, necessita de responder a alguns requisitos para efeitos de homologação. Este autocarro foi assim dimensionado para ser aprovado em diversos ensaios de acordo com o regulamento europeu “Resistência da superestrutura de veículo grandes para transporte de passageiros”, sendo eles:

- Ensaio de capotamento de um veículo completo;
- Ensaio de capotamento de uma secção de carroçaria;
- Ensaio com um pêndulo de uma secção da carroçaria;
- Verificação da resistência da superestrutura por aplicação de um método de cálculo.

Os materiais utilizados para o laminado são a fibra de vidro do tipo E e uma resina isoftálica de poliéster não saturada, e para o núcleo utiliza-se uma espuma de PVC de densidade 80 kg/m³. O modelo de carroçaria final apresenta uma massa de 1482,2 kg, não considerando a massa das janelas, e é formada por um laminado simétrico com 16 camadas de fibra dispostas a +/- 20° em relação ao eixo do mandril, com um núcleo de 42 milímetros de espessura. As propriedades gerais do laminado utilizado encontram-se na Tabela 17 e as suas propriedades mecânicas na Tabela 18 (Almeida, 2013).

Tabela 17 – Propriedades gerais do laminado utilizado (Almeida, 2013)

Tipo de laminado	Unidirecional
ρ (kg/m³)	1870
Espessura de cada camada (mm)	0,50

Tabela 18 - Propriedades mecânicas do laminado utilizado (Almeida, 2013)

E_1 (GPa)	38	G_{12} (GPa)	3.5	ν_{12}	0.3
E_2 (GPa)	8.5	G_{31} (GPa)	3.5	ν_{31}	0.3
E_3 (GPa)	8.5	G_{23} (GPa)	3.2	ν_{23}	0.3

O fabrico da carroçaria em sistemas compósitos requer a utilização de vários materiais não recuperáveis, tais como agentes desmoldantes, sacos de vácuo, catalisador, etc. Explica-se em seguida o processo de fabrico desta carroçaria, referindo de que forma estes materiais são necessários. O processo inicia-se pelo enrolamento a seco das fibras de vidro, sendo necessário a aplicação prévia de um **agente desmoldante** no mandril, para facilitar a desmoldagem posterior. Em seguida é aplicado um **filme** em volta do mandril para se obter uma boa qualidade superficial no interior da forma a ser fabricada e evitar que as fibras escorreguem sobre o mandril. É também utilizada **fita adesiva** para fixar as pontas das bobinas de fibra ao mandril e garantir que estas ficam sob tensão. Uma vez que a estrutura da carroçaria é do tipo sanduíche, é necessário o enrolamento das camadas superior e inferior. Sequencialmente, enrola-se primeiro a camada inferior, cola-se o núcleo a essa mesma camada por intermédio de um **adesivo** em *spray* e enrola-se de seguida a camada superior. Após esta fase o processo de enrolamento filamentar está terminado e pode proceder-se à infusão de resina, efetuando antes a técnica de *pinch-off*. Como já foi referido, esta técnica permite realizar as aberturas necessárias às portas e janelas do autocarro, reduzindo a permeabilidade das fibras e mantendo secas as partes destinadas às portas e janelas. Insere-se assim a pré-forma no molde e coloca-se o contra-molde na região destinada às aberturas, apertando-o com parafusos.

Para a preparação do processo de infusão, cola-se com adesivo uma porção de “*peel-ply*” sobre a forma obtida no enrolamento filamentar, seguido de um **filme micro-perfurado**, que ajuda a controlar o escoamento da resina, e do **saco de vácuo**. Coloca-se ainda um **tecido de respiro** entre o saco de vácuo e o contra-molde para evitar que o contra-molde danifique o saco de vácuo. Antes de se proceder à impregnação, a resina é misturada com um **catalisador**. Após o processo de infusão da resina, o saco de vácuo, o filme micro-perfurado e o “*peel-ply*” são removidos, bem como o filme existente no interior da estrutura que foi aplicado antes de se dar início ao enrolamento. O contra-molde é retirado, a peça final é retirada do molde e procede-se ao corte das fibras que permaneceram secas. A Tabela 19 apresenta todos os materiais recuperáveis não utilizados bem como a sua designação, e as respetivas quantidades para o fabrico de um módulo. As respetivas fichas técnicas podem ser consultadas no ANEXO B: Fichas Técnicas.

Tabela 19 - Materiais não recuperáveis utilizados no fabrico do FEUPBUS

Material	Designação	Quantidade	Unid.
Agente desmoldante	M87 High Temp Mold Release Wax [®]	1,16	kg
Filme micr-perfurado	Perforated film P1 (thickness 0,025 mm)	33,27	m ²
Fita adesiva	-	9,26	m
Adsivo em <i>spray</i>	Airtac 2 [®]	Não quantificado	-
Peel ply	Econostitch [®] (thickness 0,152 mm)	33,27	m ²
Saco de vácuo	Vacuum bag (thickness 0,1 mm)	37,06	m ²
Tecido de respiro	Compoflex [®] SB 400 (thickness 1,5 mm)	3,83	m ²
Catalisador	MEKP Liquid Hardener [®]	2,22	kg

Para o enrolamento filamentar, considerou-se que era utilizada uma máquina com uma potência de 25 kW e que, para o laminado utilizado, o processo de enrolamento demoraria cerca de 6 horas. Esta informação teve como base a máquina de enrolamento filamentar utilizada na empresa Vidropol, S.A., empresa que se dedica à transformação e aplicação de produtos fabricados em material compósito de matriz termoendurecível.

Para a infusão de resina é utilizada somente a pressão de vácuo. Considerou-se que eram utilizadas duas bombas de vácuo com uma potência de 2,5 kW cada uma. Esta razão prende-se com o fato de estas serem as bombas utilizadas pelos Estaleiros Navais de Peniche, S.A, na construção do Civitas-Bus. O Civitas-Bus apresenta uma carroçaria em sistemas compósitos, tendo sido fabricada por infusão de resina (FEUP, 2012). Os Estaleiros Navais de Peniche, S.A. constroem embarcações de pesca, barcos de transporte de passageiros e barcos para pesca desportiva, tendo uma vasta experiência de sistemas compósitos reforçados com fibra de vidro bem como com o processo de infusão a vácuo, tendo sido os responsáveis pela infusão da carroçaria do Civitas-Bus.

A substituição do alumínio por sistemas compósitos permite uma redução para 17 componentes, uma vez que a nova estrutura permite uma maior integração de componentes (Ver Anexo C2: FEUPBUS). Considera-se a inclusão de insertos feitos em contraplacado, para que numa fase posterior seja possível aparafusar o chassis ao autocarro, sendo que cada um destes insertos necessita de uma chapa de aço onde o parafuso possa roscar. Considera-se que o contraplacado tem uma densidade de 700 kg/m³ (GrantaDesign, 2013) e que as dimensões dos insertos são de 160 mm x 40 mm x 85 mm. Estas dimensões basearam-se nos insertos anteriormente utilizados na carroçaria do Civitas-Bus. Considera-se também a inclusão dos revestimentos em ABS, uma vez que a função destes é esconder a passagem dos cabos elétricos. Relativamente aos revestimentos em borracha e laminite utilizados na carroçaria em alumínio, estes não são necessários dado o bom acabamento superficial que as estruturas obtidas pelo processo RTM apresentam.

A massa total para o módulo do FEUPBUS, considerando as dimensões do módulo escolhido para a ACV, é de 359,13 kg. A Tabela 20 resume os valores de cada módulo, com respeito às suas dimensões e massas.

Tabela 20 - Dimensões das carroçarias e dos módulos do COBUS e do FEUPBUS, bem como as respetivas massas

	Carroçaria completa		Módulo	
	COBUS	FEUPBUS	COBUS	FEUPBUS
Altura (m)	2,5	2,6	2,5	2,5
Largura (m)	3	2,5	3	3
Comprimento (m)	14	8,6	1,85	1,85
Área (m²)	154	87,72	20,32	20,32
Volume (m³)	105	55,9	13,85	13,85
Massa (kg)	1650	1482,75	402,3	359,13

5.3.2 Industrialização e tempos de produção

A empresa CaetanoBus, S.A. dedica-se apenas à montagem dos autocarros. Relativamente ao modelo COBUS, objeto de estudo, todas as peças chegam às instalações da empresa já no seu estado final e aqui é efetuada toda a montagem, recorrendo-se fundamentalmente a mão-de-obra. No caso da substituição da carroçaria tradicional do COBUS por uma carroçaria em sistemas compósitos este princípio deverá manter-se, ou seja, a carroçaria deverá chegar à empresa já no seu estado final e pronta a ser montada. Uma vez que a construção da carroçaria em sistemas compósitos permite uma redução do número de componentes da mesma, irá permitir uma diminuição do tempo associado à montagem e, consequentemente, do tempo de ciclo de produção.

O fabrico do COBUS na CaetanoBus, S.A. reparte-se em três secções principais: Estrutura, Pintura e Acabamentos. Dentro destas secções existem vários postos, cada um deles contendo um determinado número de tarefas. Os postos nos quais existirá alguma alteração devido à substituição da carroçaria em alumínio por sistemas compósitos são os postos iniciais - Postos 1 e 2 da secção 26 (Estrutura). A Tabela 21 apresenta as tarefas destes dois Postos, bem como o número de horas dispendidas em cada tarefa e o número de trabalhadores afetos a cada posto. A partir do Posto 3 efetua-se a passagem da instalação elétrica, aplicação dos varões, montagem da frente e traseira, sendo que a partir deste Posto toda a montagem do autocarro é similar, independentemente da sua carroçaria. O número total de horas dispendidas no COBUS na secção Estrutura é de 329 horas, sendo que 136 horas correspondem ao Posto 1 e 2.

Tabela 21 – Tarefas do Posto 1 e Posto 2 do COBUS, número de horas dispendidas em cada tarefa e trabalhadores afetos a cada posto

Posto	Nº de trabalhadores	Tarefa nº	Nº de horas	Descrição
1	5	1	4 horas	Preparação do chassis
		2	9 horas	Aplicação do estrado em aço
		3	14 horas	Pré-montagem e aplicação do estrado em alumínio
		4	22 horas	Pré-montagem dos painéis, traseira e tejadilho em alumínio
		5	2 horas	Preparação das tampas laterais
Total de horas do Posto 1			51 horas	
2	11	1	68 horas	Montagem dos painéis laterais, tejadilho e frente em alumínio
		2	8 horas	Montagem da frente em aço
		3	8 horas	Aplicação das tampas laterais
		4	1 hora	Colocação do estribo da porta do motorista
Total de horas do Posto 2			85 horas	

Na carroçaria em sistemas compósitos todas as tarefas que estejam relacionadas com a pré-montagem ou montagem de painéis, traseira, tampas e tejadilho podem ser eliminadas, uma vez que o processo de enrolamento filamentar permite a construção de uma estrutura integrada. As tarefas de preparação do chassis e aplicação do estrado em aço mantêm-se, bem como a montagem da frente em aço e a colocação do estribo da porta de motorista. Considera-se a inserção de uma terceira na tarefa no Posto 1, que corresponde à montagem da estrutura integrada sobre o chassis.

A Tabela 22 apresenta uma solução de re-estruturação dos Postos, apresentando as tarefas que serão necessárias em cada um destes para a carroçaria em sistemas compósitos e o número de horas dispendidas em cada um deles.

Tabela 22 – Alteração dos Postos 1 e 2 para a montagem da carroçaria em sistemas compósitos

Posto	Tarefa nº	Nº de horas	Descrição
1	1	4 horas	Preparação do chassis
	2	9 horas	Aplicação do estrado em aço
	3	5 horas	Montagem da carroçaria em fibra de vidro sobre o chassis
Total de horas do Posto 1		18 horas	
2	2	8 horas	Montagem da frente em aço
	4	1 hora	Colocação do estribo da porta do motorista
Total de horas do Posto 2		9 horas	

Esta alteração permite uma redução de 109 horas na secção de Estrutura, obtendo-se um total de 190 horas de trabalho nesta secção.

6. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A informação relativa à constituição, processo de produção e materiais para a carroçaria em sistemas compósitos, foi recolhida a partir de um estudo anterior (Almeida, 2013) que teve como objetivo a conceção de uma carroçaria em estrutura sanduíche de sistemas compósitos, utilizando os mesmos materiais e processos abordados nesta dissertação. Relativamente à carroçaria em alumínio, o COBUS, a informação relativamente à constituição e processos de produção foi cedida pela empresa CaetanoBus, SA. A restante informação necessária ao estudo é retirada das bases de dados Ecoinvent versão 2 que integram o programa SimaPro usado nesta dissertação.

6.1 Objetivos e âmbito da ACV

O **objetivo** deste estudo é a comparação do impacto ambiental do módulo de uma carroçaria de autocarro fabricada em estrutura sanduíche de sistemas compósitos, mais especificamente uma resina isoftálica de poliéster não saturada reforçada com fibra de vidro do tipo E (modelo FEUPBUS) e de uma carroçaria convencional em alumínio (modelo COBUS). A avaliação é realizada abordando três fases principais da vida do produto (extração e produção de matérias-primas, fabrico dos módulos e utilização). A **unidade funcional (UF)** para as duas carroçarias é um módulo do autocarro de 1,85 metros de comprimento, 3 metros de largura e 2,5 metros de altura. Assume-se que o tempo de vida (15 anos) e que o número de quilómetros percorridos por cada modelo é idêntico.

A Tabela 23 apresenta os materiais bem como a respetiva massa para cada um dos módulos. A carroçaria em alumínio é montada manualmente e a carroçaria em sistemas compósitos é fabricada por enrolamento filamentar a seco seguido do processo RTM. Foram excluídos da análise os impactos ambientais associados às janelas de vidro e dos revestimentos em ABS, uma vez que estes foram considerados que seriam iguais e, por isso, negligenciáveis para uma análise comparativa.

Tabela 23 – Materiais usados e massa para cada módulo

	Dimensões dos módulos ou UF	Materiais	Massa (kg)
COBUS (carroçaria em alumínio)	1 módulo de 1,85 m x 3m x 2,5m	Alumínio 6106-T6	402,3
FEUPBUS (carroçaria em sistemas compósitos)		Resina isoftálica de poliéster não saturada reforçada com fibra de vidro do tipo E	359,1

O estudo contempla as fases de extração de matérias-primas e produção dos materiais utilizados nas carroçarias, o fabrico das carroçarias e a utilização das mesmas durante um tempo de vida igual a 15 anos. A fase de fim de vida não foi considerada por falta de informação relacionada com a mesma. Mais especificamente refere-se que a carroçaria em sistemas compósitos não se encontra em circulação e que todos os modelos do COBUS atualmente em circulação não atingiram ainda o seu fim de vida.

Os processos excluídos do sistema em análise incluem a produção do equipamento usado na produção das carroçarias, as instalações e outros bens usados na construção do autocarro. Não são ainda consideradas as atividades associadas ao transporte, receção e armazenamento das matérias-primas desde o seu local de produção até às instalações da CaetanoBus, S.A., onde se efetua a montagem da carroçaria. São também excluídos os resíduos gerados durante a fase de produção e utilização do autocarro, tal como a substituição de pneus, baterias e vidros. Assume-se ainda que o chassis em aço sob o qual a carroçaria assenta é o mesmo, e que os processos de ligação aos outros módulos são idênticos para cada um dos módulos em estudo. A Figura 37 apresenta as fases do ciclo de vida associadas ao ciclo de vida da carroçaria e identifica os processos considerados e excluídos do estudo.

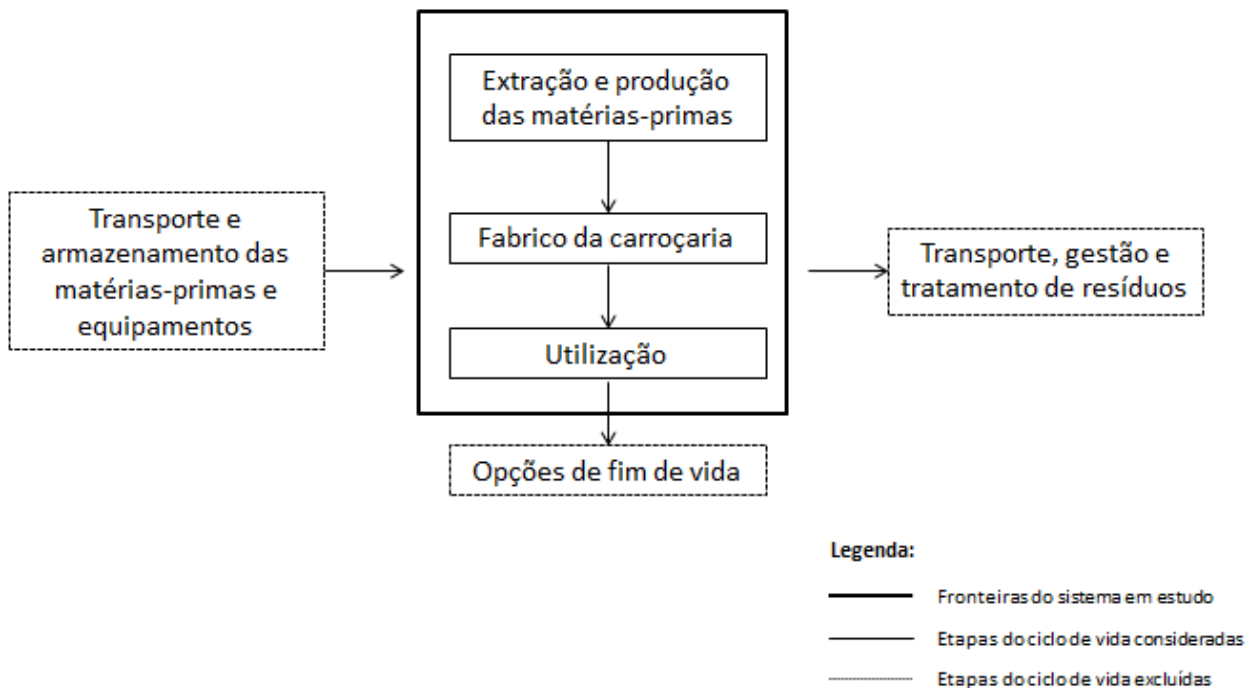


Figura 37 - Fases do ciclo de vida do módulo das duas carroçarias em estudo

6.2 Inventário do ciclo de vida

Em seguida é apresentado o inventário de materiais e energia para cada fase do ciclo de vida dos módulos do autocarro (nomeadamente a extração das matérias-primas e produção dos materiais que constituem o módulo, a produção do módulo propriamente dito e a sua utilização), quer em alumínio quer em compósitos. As secções seguintes identificam o inventário para cada módulo e para cada uma das fases do ciclo de vida consideradas. As bases de dados consultadas estão em inglês, optando-se por manter a designação original das bases de dados referentes aos processos selecionados.

6.2.1 Extração e produção das matérias-primas

A informação sobre materiais e energia associados ao processo de extração e produção das matérias-primas foi recolhida, para os dois módulos, segundo as bases de dados disponibilizadas no SimaPro.

COBUS

Relativamente ao COBUS, todos os perfis são em alumínio extrudido, enquanto os restantes componentes são em alumínio fundido. Relativamente às bases de dados usadas para a estimativa do inventário relacionado com a extração e produção dos materiais, considerou-se que os processos de produção incluem a fundição e a extrusão do alumínio. A base de dados para a fundição do alumínio inclui já o processo de produção da matéria-prima (alumínio). A base de dados para o processo de extrusão do alumínio não inclui a produção do alumínio, pelo que este necessita de ser incluído na análise. As bases de dados para o processo de produção do alumínio incluem informação sobre os fluxos de materiais e energia associados à extração das matérias-primas, geração de resíduos e emissões para o ar e para a água. O processo de extrusão inclui os subprocessos de corte, pré-aquecimento, extrusão, tratamento térmico e embalagem. Inclui ainda os fluxos de materiais e energia necessários, bem como as emissões para o ar, para a água e para o solo.

Os valores para os materiais necessários foram obtidos através das informações fornecidas pela CaetanoBus, S.A. A Tabela 24 apresenta as bases de dados que formam o inventário da fase de extração e produção das matérias-primas para o COBUS.

Tabela 24 - Bases de dados que formam o inventário da fase de extração e produção das matérias-primas para o FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m)

ENTRADAS			
Material/Processo	Designação das bases de dados utilizadas	Quantidade	Unid.
Alumínio	<i>Aluminium, primary, liquid, at plant RER, U</i>	284,4	kg
Extrusão do Alumínio	<i>Section bar extrusion, aluminium, at plant RER, U</i>	284,4	kg
Fundição do Alumínio	<i>Aluminium, production mix, cast alloy, at plant RER, U</i>	55,5	kg

FEUPBUS

Os materiais utilizados na carroçaria em sistemas compósitos são a fibra de vidro, a resina de poliéster isoftálica não saturada e a espuma de PVC. O inventário contempla os processos associados à produção das matérias-primas utilizadas no compósito, nomeadamente a fibra de vidro, a resina de poliéster não saturada e a espuma de PVC. Para tal recorre-se às bases de dados do Ecoinvent que estão disponíveis no SimaPro e disponibilizam informação ambiental associada ao processo de produção de cada material mencionado. As bases de dados de produção da resina de poliéster e produção da fibra de vidro incluem informação sobre os fluxos de materiais e energia associados à extração das matérias-primas, geração de resíduos e emissões para o ar e para a água. Uma vez que não existe uma base de dados para a

espuma de PVC, foi selecionada uma espuma rígida de poliuretano sendo este tipo de espuma também utilizada nas estruturas em sanduíche. Esta consideração é suportada pelo estudo de Almeida (2013) que afirma que a utilização desta espuma não altera a viabilidade do projeto. O processo de produção da espuma de poliuretano inclui a polimerização do poliuretano bem como a energia necessária, e inclui a geração de resíduos e emissões para o ar e para a água produzidos neste processo.

As quantidades de material necessário foram estimadas a partir do estudo de Almeida (2013), em que são referidas as quantidades necessárias para um modelo à escala real. A Tabela 25 resume as bases de dados que foram a base do inventário da fase de extração e produção das matérias-primas para o FEUPBUS.

Tabela 25 – Bases de dados que formam o inventário da fase de extração e produção das matérias-primas para o FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m)

ENTRADAS			
Material	Designação das bases de dados utilizadas	Quantidade	Unid.
Fibra de vidro	<i>Glass fibre, at plant RER, U</i>	193,1	kg
Resina de poliéster não saturada	<i>Polyester resin, unsaturated, at plant RER, U ^{a)}</i>	148	kg
Espuma rígida de poliuretano	<i>Polyurethane, rigid foam, at plant RER, U</i>	12,8	kg

a) As bases de dados não permitem especificar o tipo de resina de poliéster não saturada (isoftálica, ortoftálica), tendo-se optado apenas por uma resina de poliéster não saturada

6.2.2 Fabrico da carroçaria

A informação sobre materiais e energia associados ao processo de fabrico dos módulos foi recolhida segundo os processos disponibilizados na base de dados do SimaPro para os dois módulos.

COBUS

O fabrico do COBUS assenta na montagem manual de todos os seus componentes. Nesta fase são considerados todos os parafusos em aço usados na montagem, bem como os revestimentos em borracha e em laminite. A laminite é um termolaminado de alta pressão e é uma placa fina constituída por um conjunto de folhas de papel *kraft*, impregnadas com uma resina termoendurecível. Uma vez que este material não se encontra disponível nas bases de dados consultadas e que não é possível obter a sua composição química, foi apenas considerada a produção do papel *kraft* nesta análise. Os revestimentos em ABS não estão incluídos nesta análise pois são iguais para ambas as carroçarias e, como tal, desconsiderados para efeitos comparativos.

Considera-se a energia elétrica utilizada nas instalações da CaetanoBus, S.A., para a montagem da estrutura. A energia elétrica contabilizada não inclui a energia gasta na furação

dos perfis. Assim, inclui-se também o processo de perfuração dos perfis de alumínio, para posterior encaixe de parafusos. Este processo contabiliza a energia necessária para furar 1,641 kg de alumínio, considerando que os desperdícios são reciclados. Existem outros tipos de energia (gás natural e gasóleo) utilizados nas instalações da CaetanoBus, S.A. No entanto, uma vez que o gás natural é utilizado fundamentalmente para climatização dos edifícios e o gasóleo para provas de teste, não foram contabilizados nesta análise.

Os valores de inventário foram obtidos através das informações fornecidas pela CaetanoBus, S.A. A Tabela 26 identifica as bases de dados que foram usadas no inventário da fase de fabrico do COBUS.

Tabela 26 - Bases de dados que formam o inventário da fase de fabrico do COBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m)

ENTRADAS			
Material/Processo	Designação das bases de dados utilizadas	Quantidade	Unid.
Aço	<i>Steel, converter, unalloyed, at plant RER, U</i>	38,3	kg
Borracha	<i>Synthetic rubber, at plant RER, U</i>	12,4	kg
Laminite	<i>Kraft paper, bleached, at plant RER, U</i>	12,9	kg
Furação	<i>Drilling, conventional, aluminium, at plant RER, U</i>	1,6 ^{a)}	kg
Energia eléctrica	<i>Electricity, medium voltage, production PT, at grid PT, U</i>	626,5	kWh

a) Quantidade de material que é considerada desperdício após todos os furos terem sido efetuados

FEUPBUS

Na fase do fabrico do módulo inclui-se todos os materiais não recuperáveis e energia necessários para o fabrico do mesmo. No fabrico do módulo é utilizado o agente desmoldante M87 High Temp Mold Release Wax[®] e o catalisador MEKP Liquid Hardener[®], que não se encontram disponíveis nas bases de dados do SimaPro. Para ultrapassar esta questão, o inventário inclui cada um dos componentes (agentes químicos) que os constituem, de acordo com a sua percentagem na composição. No entanto, não foram consideradas eventuais emissões gasosas e resíduos associados à aplicação destes produtos

O fabrico e montagem do módulo em sistemas compósitos engloba os processos de enrolamento filamentar e RTM, sendo que para tal se utiliza unicamente a energia eléctrica. Inclui-se um revestimento que diz respeito à técnica PIMC (“*Powder in-mould coating*”), para se obter um bom acabamento superficial. Considera-se também a energia eléctrica utilizada nas instalações da CaetanoBus, S.A., para a montagem da estrutura. Este valor foi estimado com base nas reduções obtidas para o tempo de ciclo de produção na secção 5.3.2 o que, consequentemente, se traduz numa redução do consumo de energia eléctrica. Existem outros tipos de energia consumidos nas instalações da CaetanoBus, S.A. contudo considerou-se que estes se mantinham inalterados e, como tal, não foram incluídos nesta análise.

As quantidades de material necessário foram estimadas a partir do estudo de Almeida (2013), em que são referidas as quantidades necessárias para um modelo à escala real. A

Tabela 27 apresenta as bases de dados que formam o inventário da fase de fabrico do FEUPBUS.

Tabela 27 - Bases de dados que formam o inventário da fase de fabrico do FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m)

ENTRADAS				
	Material/Processo	Designação das bases de dados utilizadas	Quantidade	Unid.
Agente desmoldante	Nafta (60%)	<i>Naphtha, at regional store RER, U</i>	0,695	kg
	<i>Distillates (petroleum), hydrotreated light (30%)</i>	- ^{a)}	0,347	kg
	<i>Siloxanes and silicones, di-Me (10%)</i>	<i>Silicone product, at plant RER, U</i>	0,116	kg
	Filme micro-perfurado: Polietileno	<i>Packaging film, LDPE, at plant RER, U</i>	0,763	kg
	Fita selante: Alumínio e Polietileno	<i>Sealing tape, aluminium/PE, 50 mm wide, at plant RER, U</i>	9,264	m
Catalisador	<i>Methyl Ethyl Ketone Peroxide (40%)</i>	<i>Methyl Ethyl Ketone, at plant RER, U</i>	0,888	kg
	<i>Dimethyl Phthalate (50%)</i>	<i>Dimethyl sulphate, at plant RER, U</i>	1,110	kg
	<i>Dialkyl Phthalate (10%)</i>	- ^{a)}	0,222	kg
	<i>Peel-ply: Nylon</i>	<i>Nylon, at plant RER, U</i>	5,482	kg
	Tecido de respiro: Nylon	<i>Nylon, at plant RER, U</i>	6,221	kg
	Saco de vácuo: Polietileno	<i>Packaging film, LPDE, at plant RER, U</i>	3,398	kg
	Insertos de madeira: Contraplacado	<i>Plywood, outdoor use, at plant RER, U</i>	0,0021	m ³
	Chapa de aço: Aço	<i>Steel, converter, unalloyed, at plant RER, U</i>	0,374	kg
	Enrolamento Filamentar	<i>Electricity, medium voltage, production PT, at grid PT, U^{b)}</i>	142	kWh
	RTM	<i>Electricity, medium voltage, production PT, at grid PT, U^{c)}</i>	29,14	kWh
	Revestimento	<i>Coating powder, at plant RER, U</i>	10,15	m ²
	Energia elétrica	<i>Electricity, medium voltage, production PT, at grid PT, U^{d)}</i>	391,15	kWh

- a) Não existe nas bases de dados disponíveis, no entanto, dada a sua pequena percentagem na constituição total do módulo (menos de 1%), considerou-se que podia ser desprezado
- b) Estimado a partir das informações obtidas pela Vidropol, S.A.
- c) Estimado a partir das informações obtidas pelos Estaleiros Navais de Peniche, S.A. e que foram utilizadas no fabrico do Civitas-Bus
- d) Estimado a partir da redução do número de horas de produção obtido na secção 5.3.2

6.2.3 Utilização

Na fase de utilização foram consideradas a produção e o consumo de combustível. Ambos os veículos são movidos a *diesel* e não são considerados ajustes no *powertrain*⁴ devido à redução de peso do veículo. A massa volúmica do *diesel* foi considerada como sendo de 845 kg/m³ (DieselNet, 2014).

O consumo de combustível está relacionado com o peso do veículo, sendo portanto necessário determinar essa relação. A avaliação do ciclo de vida incide apenas sobre um módulo da carroçaria sendo que este representa apenas uma percentagem da massa total do autocarro e, como tal, é responsável apenas por uma fracção do impacto ambiental causado pelo autocarro ao longo do seu tempo de vida. O “Método Incremental” é geralmente usado para alocar o consumo hipotético de combustível de cada componente de um automóvel e é aqui utilizado para determinar qual o consumo associado a cada módulo (Subic, 2006). Este método considera apenas o efeito da massa do veículo, não considerando outros fatores, como por exemplo efeitos aerodinâmicos. A Equação 5 é utilizada para calcular o consumo de combustível associado ao módulo do COBUS e a Equação 6 é utilizada para calcular o consumo de combustível associado ao módulo do FEUPBUS.

$$C_{refcomp} = C_{refveic} \times (M_{refcomp}/M_{refveic}) \times c$$

Equação 5 – Consumo de combustível do módulo de referência – COBUS (Subic, 2006)

$$C_{altcomp} = C_{refveic} \times (M_{altcomp}/M_{refveic}) \times c$$

Equação 6 – Consumo de combustível do módulo alternativo – FEUPBUS (Subic, 2006)

Em que:

$C_{refcomp}$ = consumo de combustível do componente de referência (COBUS), em kg/100km

$C_{altcomp}$ = consumo de combustível do componente alternativo (FEUPBUS), em kg/100 km

$C_{refveic}$ = consumo de combustível do veículo de referência, em kg/100 km (COBUS – 33,8 kg/100 km)

$M_{refcomp}$ = massa do componente de referência, em kg (massa do módulo COBUS – 402,3 kg)

$M_{refveic}$ = massa do veículo de referência, em kg (massa do veículo COBUS – 12 toneladas)

$M_{altcomp}$ = massa do componente alternativo, em kg (massa do módulo FEUPBUS – 359,1 kg)

⁴ *Powertrain* – conjunto de componentes que realizam trabalho para movimentar o veículo (motor, transmissão, eixos de transmissão, etc)

c = coeficiente massa-combustível. Neste caso, o factor c representa o “Valor de Redução do Consumo de Combustível”, que é utilizado para reduzir a um valor incremental a alocação direta da massa de um determinado componente.

O valor de c considerado foi 0,6, uma vez que este é considerado como representativo para a maioria dos estudos de avaliação do ciclo de vida (Ribeiro, 2007). A Equação 5 e a Equação 6 permitem obter os consumos do módulo do COBUS e do FEUPBUS, que são 0,83 l/100 km e 0,72 l/100 km, respetivamente. Os consumos calculados estão apenas associados ao módulo, e não à carroçaria completa.

A Tabela 28 apresenta o consumo de combustível associado aos dois módulos para 1, 5 e 15 anos de vida.

Tabela 28 – Consumo de combustível (litros) do módulo COBUS e do módulo FEUPBUS para 1, 5 e 15 anos de vida, em função da distância em quilómetros percorridos

Ano	Número de quilómetros percorridos (km)	Consumo associado ao módulo COBUS (l)	Consumo associado ao módulo FEUPBUS (l)
1	29 200	236,3	211
5	146 000	1181,7	1054,9
15	438 000	3545	3165

A Figura 38 apresenta o consumo de combustível, em litros, em função do tempo, em anos. É possível verificar que, à medida que o tempo vai aumentando, a poupança associada ao consumo de combustível vai sendo mais significativa. Para este estudo considera-se um tempo de vida da carroçaria de 15 anos e o consumo de combustível associado a este período.

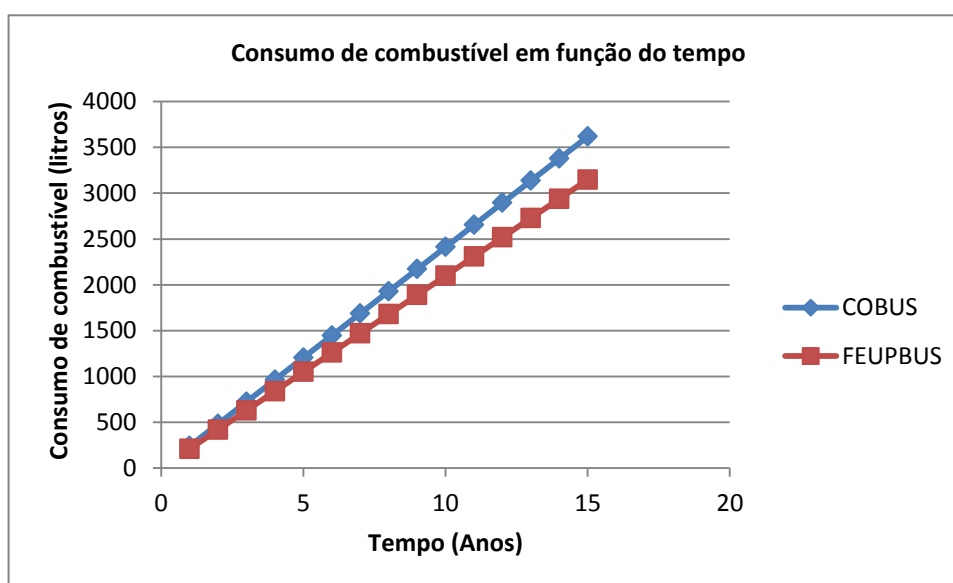


Figura 38 - Consumo de combustível (litros) em função do tempo (anos)

A informação sobre materiais e energia associados à produção do combustível foi retirada das bases de dados do SimaPro. As emissões gasosas associadas à combustão do *diesel* para a movimentação dos veículos foram calculadas usando os fatores de emissão disponibilizados pelo EMEP/EEA (2009). Os fatores de emissão expressam a quantidade de cada poluente emitida para o ar por cada quilograma de combustível utilizado. Os valores utilizados nos cálculos podem ser consultados na Tabela 29.

Tabela 29 – Fatores de emissão para a combustão de *diesel* em veículos pesados (EMEP/EEA 2009)

Poluente	Factor de emissão	Unidade
CO	7,5	g/kg combustível
NM VOC	1,9	g/kg combustível
NO _x	33,4	g/kg combustível
PM	0,9	g/kg combustível
N ₂ O	5,1E-02	g/kg combustível
NH ₃	2,1E-02	g/kg combustível
ID (1,2,3-cd)P	7,9E-06	g/kg combustível
B(k)F	3,4E-05	g/kg combustível
B(b)F	3,1E-06	g/kg combustível
B(a)P	5,1E-06	g/kg combustível
Pb	5,2E-05	g/kg combustível
CO ₂	3,14	kg/kg combustível

A Tabela 30 apresenta o inventário da fase de utilização do COBUS e a Tabela 31 apresenta o inventário da fase de utilização do FEUPBUS.

Tabela 30 - Inventário da fase de utilização do COBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m)

ENTRADAS			
Material	Designação das bases de dados utilizadas	Quantidade	Unid.
<i>Diesel</i>	<i>Diesel, at refinery RER, U</i>	2996	kg
SAÍDAS			
Origem	Poluentes	Quantidade	Unid.
<i>Diesel</i>	CO	23	kg
	NM VOC	5,7	kg
	NO _x	100	kg
	PM	3	kg
	N ₂ O	0,15	kg
	NH ₃	0,035	kg
	ID (1,2,3-cd)P ^{a)}	2,4E-05	kg
	B(k)F ^{b)}	1,0E-04	kg
	B(b)F ^{c)}	9,2E-05	kg
	B(a)P ^{d)}	1,5E-05	kg
	Pb	1,6E-05	kg
	CO ₂	9406	kg

a) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – indeno(1,2,3-cd) pireno

b) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(k) fluoranteno

c) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(b) fluoranteno

d) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(a) pireno

Tabela 31 - Inventário da fase de utilização do FEUPBUS, em função da unidade funcional (UF = 1 módulo com as seguintes dimensões: 1,85m x 3m x 2,5m)

ENTRADAS			
Material	Designação da base de dados utilizada	Quantidade	Unid.
<i>Diesel</i>	<i>Diesel, at refinery RER, U</i>	2674	kg
SAÍDAS			
Origem	Poluentes	Quantidade	Unid.
<i>Diesel</i>	CO	20	kg
	NM VOC	5,1	kg
	NO _x	89,2	kg
	PM	2,5	kg
	N ₂ O	0,13	kg
	NH ₃	0,032	kg
	ID (1,2,3-cd)P ^{a)}	2,1E-05	kg
	B(k)F ^{b)}	9,2E-05	kg
	B(b)F ^{c)}	8,2E-05	kg
	B(a)P ^{d)}	1,3E-05	kg
	Pb	1,4E-04	kg
	CO ₂	8396,664	kg

- a) a) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – indeno(1,2,3-cd) pireno
 b) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(k) fluoranteno
 c) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(b) fluoranteno
 d) Hidrocarbonetos policíclicos e poluentes orgânicos persistentes – benzo(a) pireno

6.3 Avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida

Para a avaliação dos impactos ambientais é usado o *software* SimaPro versão 7.1.8. (PRé-Consultants 2011). O SimaPro permite a modelização de sistemas de produtos ou serviços numa perspetiva do ciclo de vida e inclui bases de dados com informação relativa aos materiais, energias e emissões associadas aos materiais e processos em estudo. O método de avaliação dos impactos ambientais utilizado é o ReCiPe 2008, sendo o impacto ambiental calculado usando as abordagens *midpoint* e *endpoint*. Este método permite converter a lista de inventário num número limitado (18) de categoriais de impacte ambiental através do uso de factores de caracterização que expressam a contribuição de cada poluente para cada categoria de impacte ambiental (abordagem *midpoint*), ou então usando factores de ponderação que permitem agregar as categorias identificadas em três indicadores finais (abordagem *endpoint*): Saúde humana, Qualidade dos Ecossistemas e Recursos Naturais. As 18 categorias de impacto ambiental intermédias consideradas são: Alteração Climática, Depleção da Camada de Ozono, Acidificação Terrestre, Eutrofização da Água Doce, Eutrofização da Água Salgada, Toxicidade Humana, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Formação de Partículas,

Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade da Água Doce, Ecotoxicidade da Água Salgada, Radiação Ionizante, Ocupação de Terras Agrícolas, Ocupação de Solo Urbano, Transformação de Terrenos Naturais, Depleção Aquática, Depleção de Recursos Naturais e Depleção de Combustíveis Fósseis. O ReCIPE 2008 utiliza três perspetivas diferentes para a ponderação dos diferentes problemas ambientais: Individualista, Hierárquica e Igualitária. Utiliza-se aqui uma perspetiva Hierárquica, que adota uma visão equilibrada entre o curto e o longo prazo, sendo os impactos ambientais relevantes desde que haja consenso sobre os seus efeitos. A perspetiva Individualista adota uma visão a curto prazo e só se considera relevante os impactos ambientais que tenham uma relação comprovada com as suas consequências para o ser humano; a perspetiva Igualitária adota uma visão de longo prazo a qual prevalece sobre o curto prazo, sendo que os impactos ambientais são tidos como muito relevantes, considerando-se que podem conduzir a situações de catástrofe (Ferrão,2009).

A Tabela 32 apresenta uma breve descrição das categorias de impacto ambiental consideradas no método ReCIPE 2008 (*midpoint* e *endpoint*), indicando as respetivas unidades.

Tabela 32 – Categorias de impacto ambiental consideradas no método ReCiPe 2008, nas abordagens *midpoint* e *endpoint* (Goedkoop et al. 2013)

Categoria de Impacto Ambiental		
<i>Midpoint</i>	Unid.	Descrição
Alteração Climática	kg (CO ₂ para o ar)	Potencial de aquecimento global, quantificado através das emissões de dióxido de carbono para o ar
Depleção Camada Ozono	kg (CFC-11 para o ar)	Potencial da depleção da camada de ozono, quantificado através das emissões de CFC-11
Toxicidade Humana	kg (14DCB para o ar urbano)	Potencial de intoxicação humana através da inalação de substâncias tóxicas
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg (NMVOC para o ar urbano)	Potencial de formação de ozono através da reação fotoquímica de NO _x com NMVOC
Formação de Partículas	kg (PM ₁₀ para o ar)	Potencial de problemas de saúde humana devido à inalação de partículas em suspensão
Radiação Ionizante	kg (U235 para o ar)	Potencial de problemas de saúde humana devido à libertação de material radioativo para o meio ambiente
Acidificação Terrestre	kg (SO ₂ para o ar)	Potencial de acidificação do solo terrestre devido às emissões de SO ₂ para o ar
Eutrofização Água Doce	kg (P para a água)	Potencial de eutrofização (excesso de nutrientes) devido às emissões de fósforo e nitrogénio para a água
Eutrofização Água Salgada	Kg (N para a água)	
Ecotoxicidade Terrestre	kg (14DCB para o solo)	Potencial de intoxicação do solo e da água devido às emissões de substâncias tóxicas
Ecotoxicidade Água Doce	kg (14DCB para a água doce)	
Ecotoxicidade Água Salgada	kg (14DCB para a água salgada)	
Ocupação Terras Agrícolas	m ² x ano (solo agrícola)	Potencial de danos nos ecossistemas (perda de biodiversidade) devido à ocupação e transformação do solo
Ocupação Solo Urbano	m ² x ano (solo urbano)	
Transformação de Terrenos Naturais	m ² (solo natural)	
Depleção Aquática	m ³ (água)	Quantidade de água que é utilizada e não é reaproveitada
Depleção de Recursos	kg (Fe)	Quantidade de minerais utilizados

Depleção de Combustíveis Fósseis	kg (petróleo)	Quantidade de combustíveis fósseis (grupo de recursos que contém hidrocarbonetos) que são utilizados
<i>Endpoint</i>	Unid.	Descrição
Saúde Humana	DALY ^{a)}	Consequências que danos ambientais possam ter na saúde humana (doenças respiratórias, cancro, entre outros)
Ecosistemas	espécies x ano	Quantifica a qualidade dos ecossistemas, assumindo que a diversidade de espécies numa determinada área e por um determinado período de tempo representa a qualidade do ecossistema
Recursos	\$	Quantifica o modo como a extração de recursos atuais provoca um aumento no custo para que as gerações vindouras possam usufruir desses mesmos recursos

a) DALY – número de anos equivalentes de incapacitação (“*Disability Adjusted Life Years*”)

7. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisados e discutidos os resultados do impacto ambiental utilizando o método Europe ReCiPe (H/A), segundo as abordagens *midpoint* e *endpoint*. O “H” corresponde à perspetiva Hierárquica adotada, e o “A” corresponde à normalização dos valores com uma média ponderada. Apresentam-se os resultados da Caracterização e Ponderação para os dois módulos. Os dois módulos são comparados para as categorias de impacto ambiental intermédias (*midpoint*) e para as finais (*endpoint*).

7.1 Resultados da Caracterização de cada módulo

Na Caracterização é calculado o contributo dos diversos aspetos ambientais para cada categoria do impacto ambiental, através da utilização de fatores de caracterização que são multiplicados pelos consumos de recursos e emissões de poluentes. A Figura 39 apresenta os resultados da etapa de Caracterização para o módulo COBUS para cada uma das fases do ciclo de vida consideradas no estudo. O módulo COBUS contribui para 16 categorias de impacto ambiental identificadas. A fase de Utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental para dez das categorias de impacto ambiental, nomeadamente, Alteração Climática (Saúde Humana e Ecossistemas), Depleção da Camada de Ozono, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Formação de Partículas, Acidificação Terrestre, Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Ecotoxicidade de Água Salgada, Transformação de Terrenos Naturais. Para essas categorias a contribuição é sempre superior a 58%. A fase de Extração e produção de matérias-primas é a fase que mais contribui nas restantes categorias de impacto ambiental, nomeadamente Toxicidade Humana, Radiação Ionizante, Eutrofização Água Doce, Ocupação Solo Urbano, Depleção de Recursos e Depleção de Combustíveis Fósseis. A contribuição desta fase é também sempre superior a 52%. A única exceção verifica-se para a categoria de Ocupação de Terras Agrícolas, em que a fase de Fabrico é predominante, apresentando uma contribuição de aproximadamente 62%. A fase de Fabrico apresenta-se como sendo a predominante na categoria de Ocupação de Terras Agrícolas devido aos impactes associados com a produção do papel *kraft* utilizado no fabrico da laminite usada nos revestimentos.

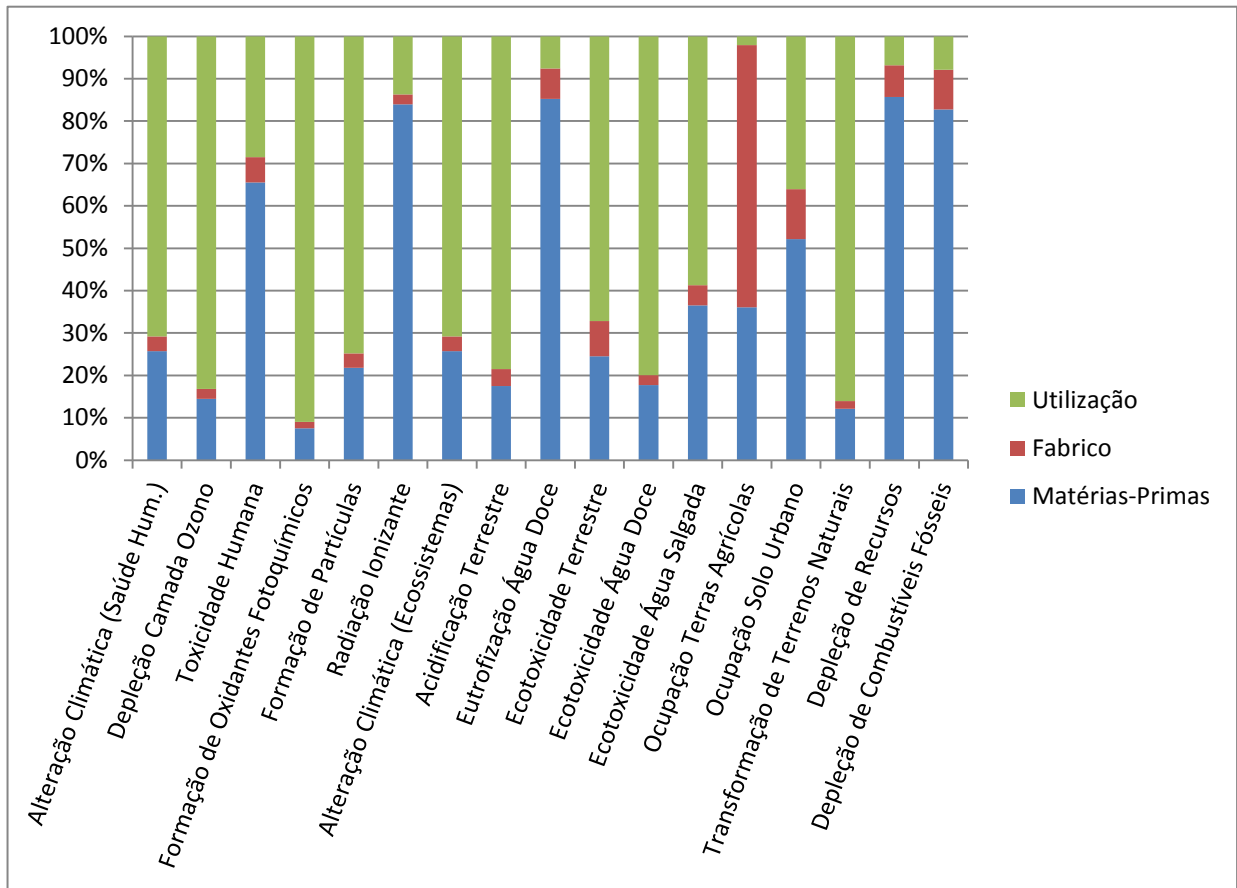


Figura 39 - Resultados da etapa de Caracterização para o módulo COBUS para cada categoria de impacto ambiental

A Figura 40 apresenta os resultados da etapa de Caracterização para o módulo FEUPBUS. O módulo FEUPBUS contribui para 16 categorias de impacto ambiental identificadas. Novamente a fase de Utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental para onze das categorias de impacto ambiental, nomeadamente, Alteração Climática (Saúde Humana e Ecosistemas), Depleção da Camada de Ozono, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Formação de Partículas, Acidificação Terrestre, Ecotoxicidade Terrestre, Ecotoxicidade de Água Doce, Ecotoxicidade de Água Salgada, Ocupação Solo Urbano e Transformação de Terrenos Naturais. Para estas categorias a contribuição é sempre superior a 56%. A fase de Extração e produção das matérias-primas é a fase que mais contribui para as categorias Toxicidade Humana, Radiação Ionizante, Eutrofização Água Doce, Depleção de Recursos e Depleção de Combustíveis Fósseis. A fase de Fabrico é a fase que mais contribui para a categoria Ocupação de Terras Agrícolas, com uma contribuição de 57%. A fase de Fabrico apresenta-se como a predominante na categoria Ocupação de Terras Agrícolas devido à madeira utilizada para o fabrico dos insertos que serão utilizados para posterior fixação ao chassis.

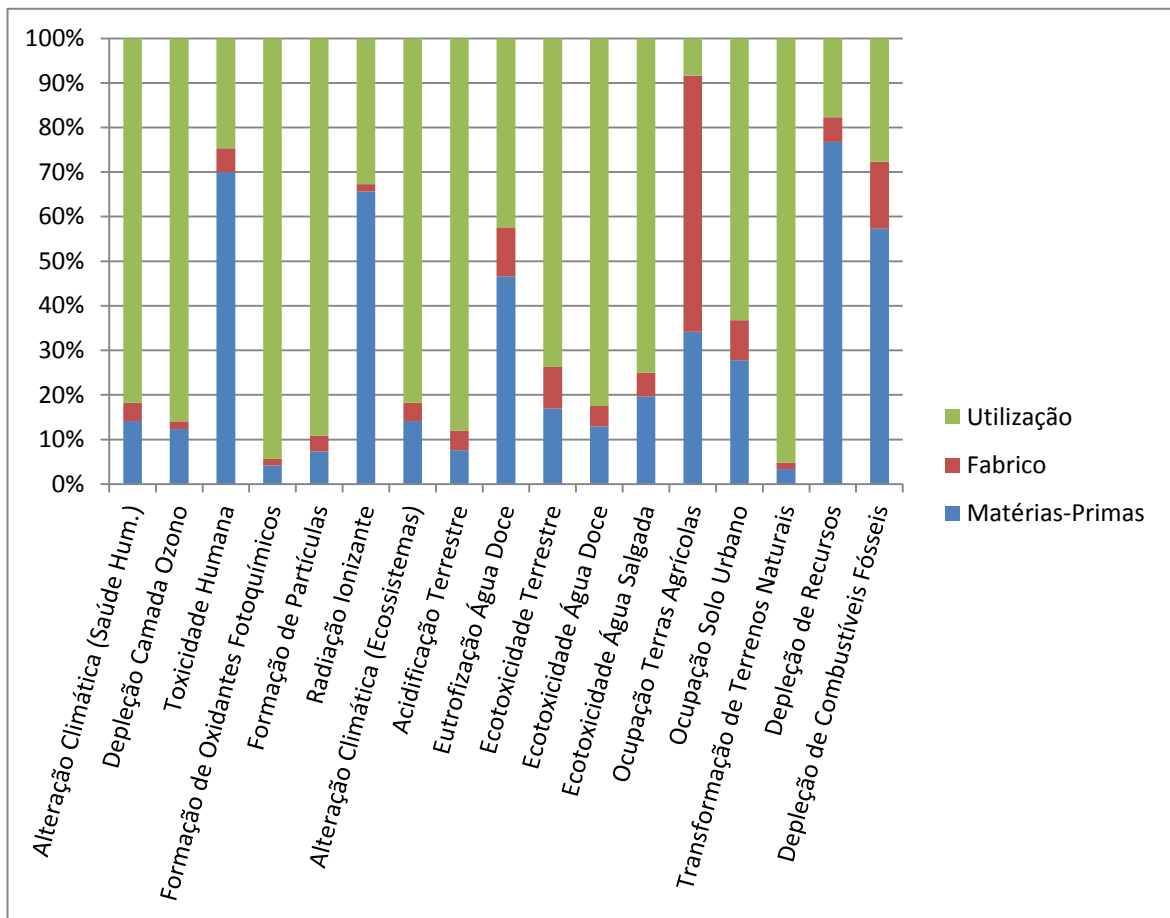


Figura 40 - Resultados da etapa de Caracterização para o módulo FEUPBUS para cada categoria de impacto ambiental

No Anexo D podem ser consultadas as árvores correspondentes ao ciclo de vida de cada um dos módulos. O Anexo D1 apresenta a árvore correspondente ao ciclo de vida do COBUS e o Anexo D2 apresenta a árvore correspondente ao ciclo de vida do FEUPBUS. Os blocos a cinzento representam processos unitários e os blocos azuis representam “*assemblies*”, um conjunto de processos unitários. As setas a vermelho representam o fluxo de materiais e energia, e a sua espessura é proporcional ao impacto ambiental acumulado que caracteriza a sequência de processos. Os processos que apresentam um impacto ambiental inferior a 3,8% do total não estão visíveis.

7.2 Comparação entre o módulo COBUS e FEUPBUS

Nesta secção apresenta-se uma comparação entre o impacto ambiental do COBUS e do FEUPBUS. É efetuada a comparação do desempenho ambiental dos dois módulos para todo o seu ciclo de vida e para cada uma das fases do ciclo de vida consideradas.

7.2.1 Comparação dos resultados da Caracterização

A Figura 41 apresenta os resultados comparativos de etapa de Caracterização para os módulos em estudo. O FEUPBUS apresenta um melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impacto ambiental, com a exceção da Toxicidade Humana. Verifica-se ainda que nas categorias de Radiação Ionizante, Eutrofização da Água Doce, Ocupação de Terras Agrícolas, Depleção de Recursos e Depleção de Combustíveis Fósseis, o COBUS apresenta impactos que são superiores em 50% face ao FEUPBUS. O FEUPBUS apresenta um impacto superior na categoria de Toxicidade Humana devido à emissão de arsénio durante o processo de fabrico da fibra de vidro.

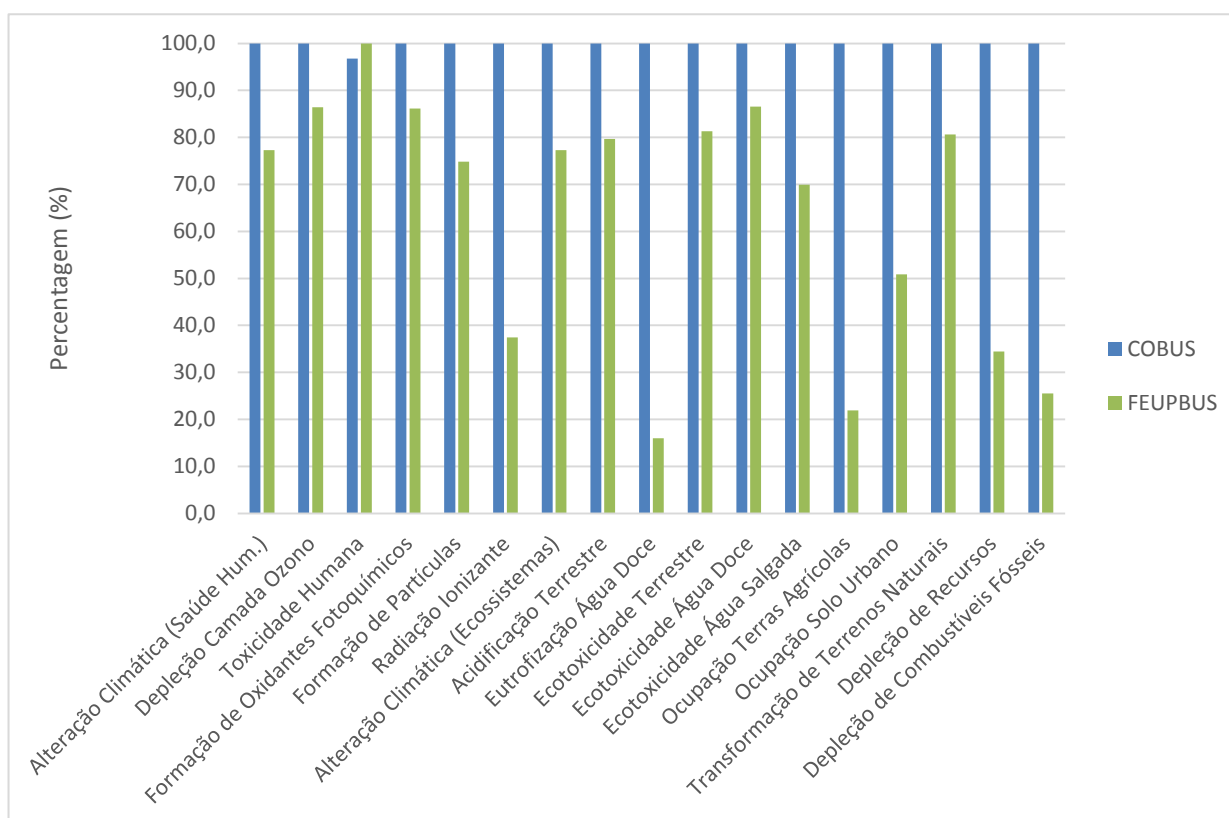


Figura 41 – Resultados comparativos da etapa de Caracterização para os dois módulos em estudo

7.2.2 Resultados da Ponderação

Os resultados obtidos na etapa de Ponderação são expressos em termos de um indicador único (“*single score*”), quantificado em pontos (Pt). As categorias de impacto ambiental finais (*endpoint*) são calculadas através das categorias de impacto ambiental intermédias (*midpoint*) usando de fatores de Ponderação. Estes fatores podem ser consultados no Anexo D: Fatores de conversão para a agregação das categorias de impacto ambiental Midpoint em indicadores. A Figura 42 apresenta a comparação entre o COBUS e o FEUPBUS para as categorias de impacto ambiental, expresso em Pontos (Pt).

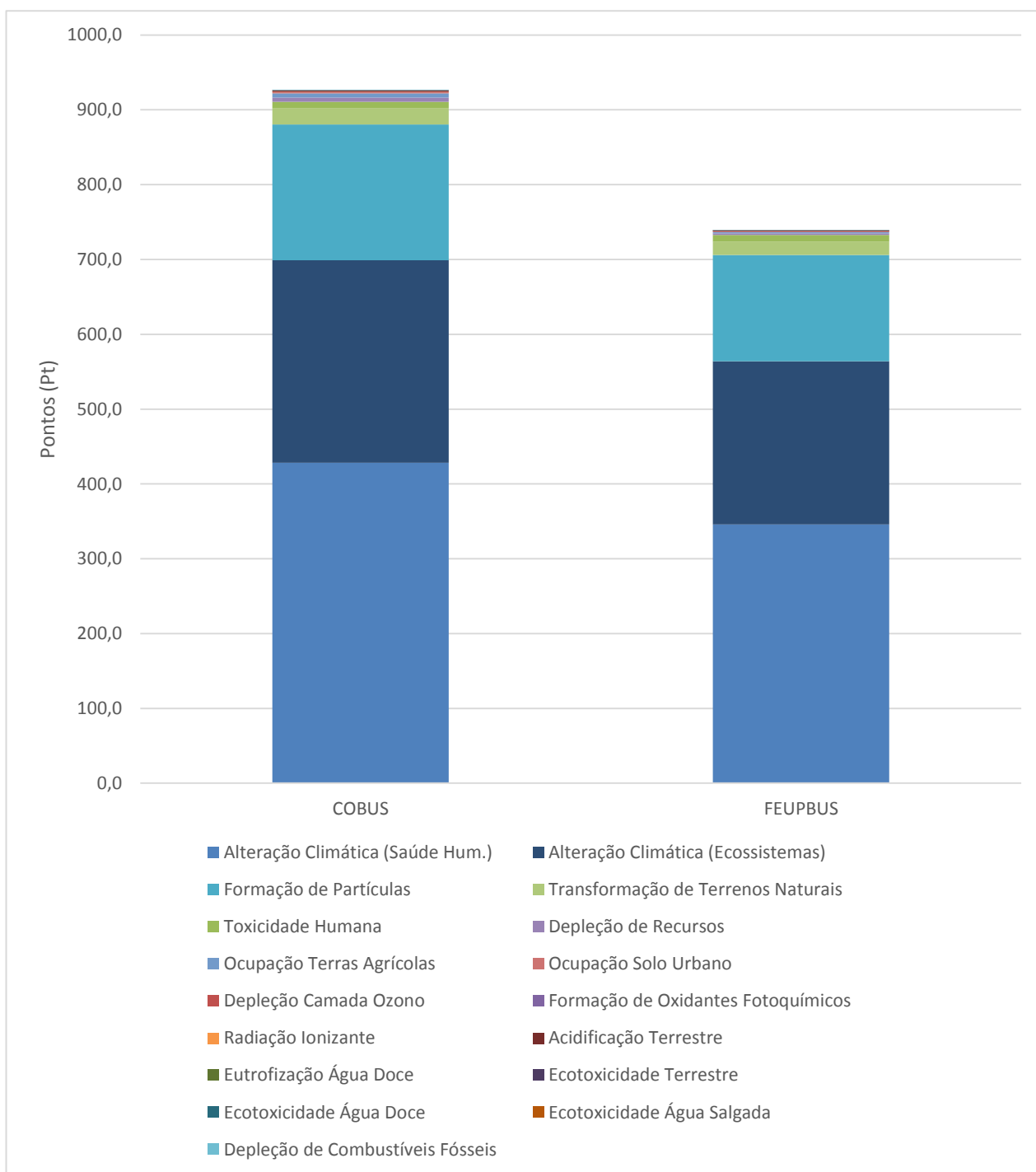


Figura 42 - Comparação entre o módulo COBUS e FEUPBUS, para as categorias de impacto ambiental *midpoint*, expresso em pontos (Pt)

Os resultados expressos na Figura 42 indicam que o COBUS apresenta um impacto ambiental expresso num total de 920 pontos e o FEUPBUS de 703 pontos. Verifica-se que o impacto ambiental do FEUPBUS é 24% inferior ao do COBUS. Para ambos os produtos a categoria de impacto ambiental Alteração Climática (Saúde Humana) é a que apresenta um maior impacto, seguida das categorias Formação de Partículas e Alteração Climática (Ecossistemas). Na base desta contribuição está a emissão de dióxido de carbono e de óxidos de azoto associados à combustão de fósseis durante a Utilização – transporte de passageiros.

A Figura 43 apresenta a comparação entre o módulo COBUS e o FEUPBUS para as categorias de impacto ambiental designadas por *endpoint* (finais). Aqui as categorias de impacto ambiental anteriores são agrupadas em três grandes categorias: Saúde Humana, Recursos e Ecossistemas.

A Saúde Humana é o indicador final onde mais se reflete o impacto ambiental de ambos os módulos, seguida dos Ecossistemas. A categoria intermédia Alteração Climática, categoria que apresenta o maior impacto ambiental para ambos os módulos (ver Figura 42) contribui para os indicadores finais Saúde Humana e Ecossistemas, justificando assim que estes indicadores finais apresentem um maior impacto que o indicador Recursos. A categoria intermédia Formação de Partículas, a segunda maior contribuidora para o impacto ambiental de ambos os módulos, contribui para o indicador final Saúde Humana. Justifica-se assim que a Saúde Humana seja o indicador final onde mais se reflete o impacto ambiental de ambos os módulos. Na base das contribuições para as categorias de Alteração Climática e Formação de Partículas está a emissão de dióxido de carbono e óxidos de azoto na fase de Utilização dos veículos, sendo assim possível afirmar que esta fase é a que apresenta uma maior contribuição para o indicador final Saúde Humana.

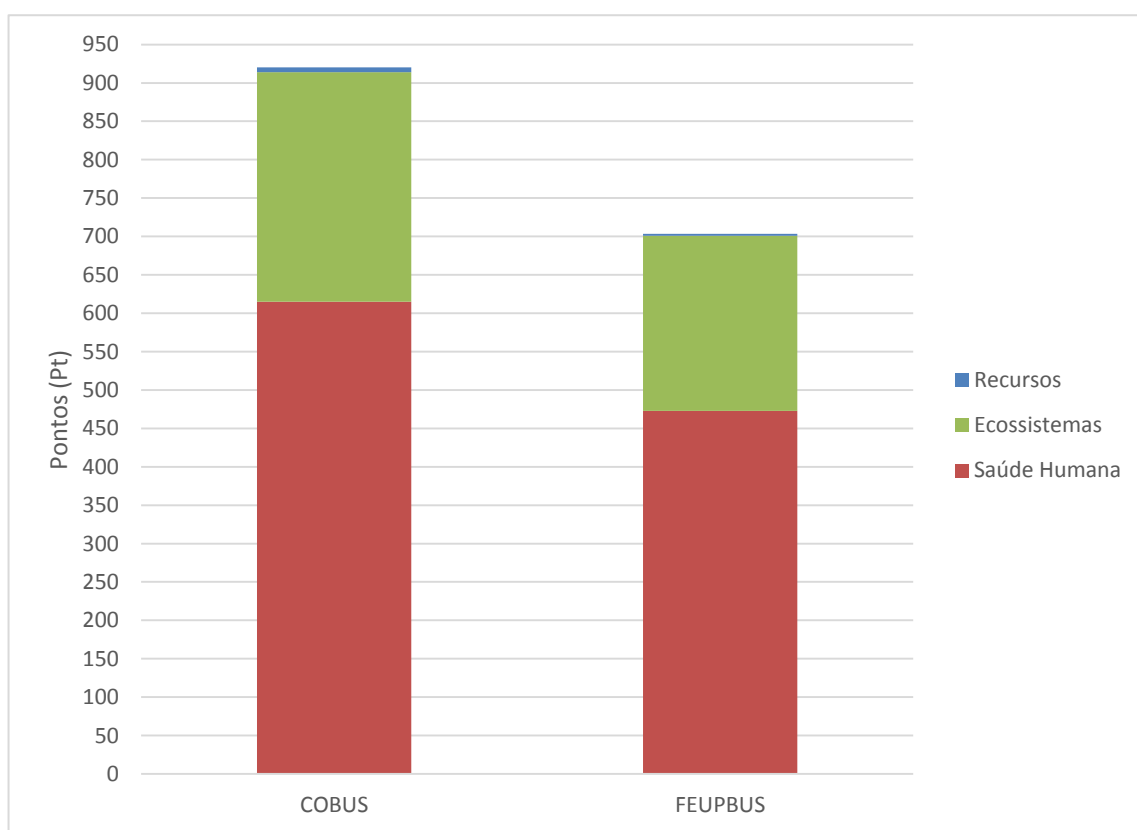


Figura 43 - Comparação entre o módulo COBUS e FEUPBUS, para as categorias de impacto ambiental *endpoint*, expresso em pontos (Pt)

7.2.3 Impacto ambiental associado a cada uma das fases do ciclo de vida consideradas

A Figura 44 apresenta o impacto ambiental dos módulos COBUS e FEUPBUS, para cada fase do ciclo de vida considerada, tendo por base os resultados obtidos para as categorias de impacto ambiental *endpoint* expresso em pontos (Pt).

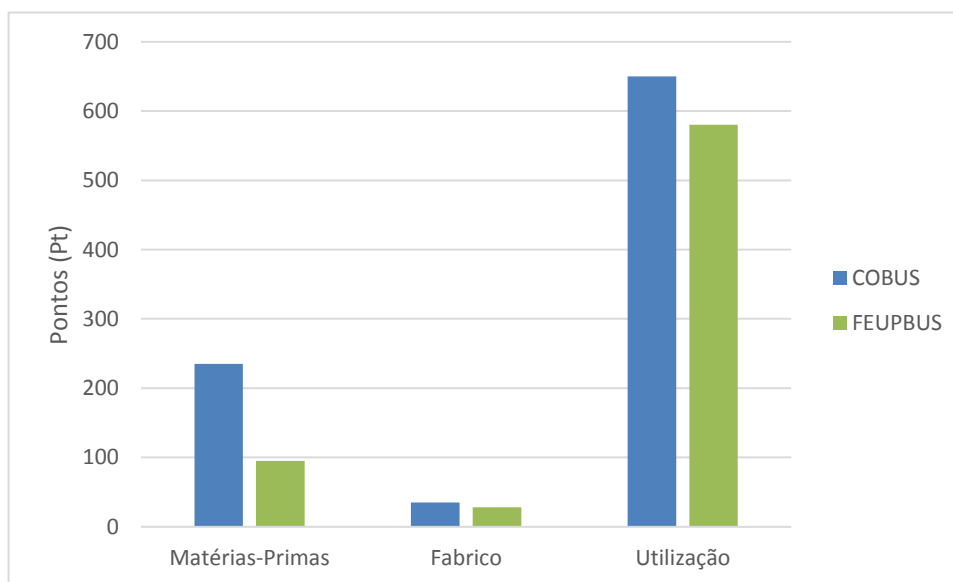


Figura 44 - Comparação entre o COBUS e o FEUPBUS, em pontos (Pt) para cada fase do ciclo de vida considerada para as categorias de impacto ambiental *endpoint*, expresso em Pontos (Pt)

Para todas as fases do ciclo de vida consideradas o COBUS apresenta um impacto ambiental superior ao FEUPBUS. Para a Utilização, a fase que mais contribui para o impacto ambiental de ambos os módulos, o valor é de 650 pontos no COBUS e 580 pontos no FEUPBUS. A fase de Extração de matérias-primas, representa 235 pontos no COBUS e 95 pontos no FEUPBUS, e a fase de Fabrico representa 35 pontos no COBUS e 28 pontos no FEUPBUS.

Constata-se que, para o COBUS, o processo que mais contribui para o impacto associado à extração das matérias primas é a produção e extrusão do alumínio. Já para o FEUPBUS o processo é a produção da resina de poliéster, sendo estes os processos determinantes para o impacto ambiental desta fase.

De modo a entender-se melhor este resultado, a Figura 45 compara o impacto ambiental referente à produção e extrusão de 1 kg de alumínio e 1 kg de resina de poliéster, expresso em Pontos (Pt), para as categorias de impacto ambiental *midpoints*.

A produção e extrusão de 1kg de alumínio (0,789 Pt) apresenta um impacto ambiental superior à produção de 1 kg de resina de poliéster (0,395 Pt). Justifica-se assim que fase de Extração e produção das matérias-primas apresente um impacto ambiental superior para o COBUS face ao FEUPBUS. Para além disso, para o fabrico do módulo do COBUS é

necessário uma quantidade de matéria-prima superior à necessária para o FEUPBUS (284,4 kg de alumínio necessários face a 148 kg de resina de poliéster).

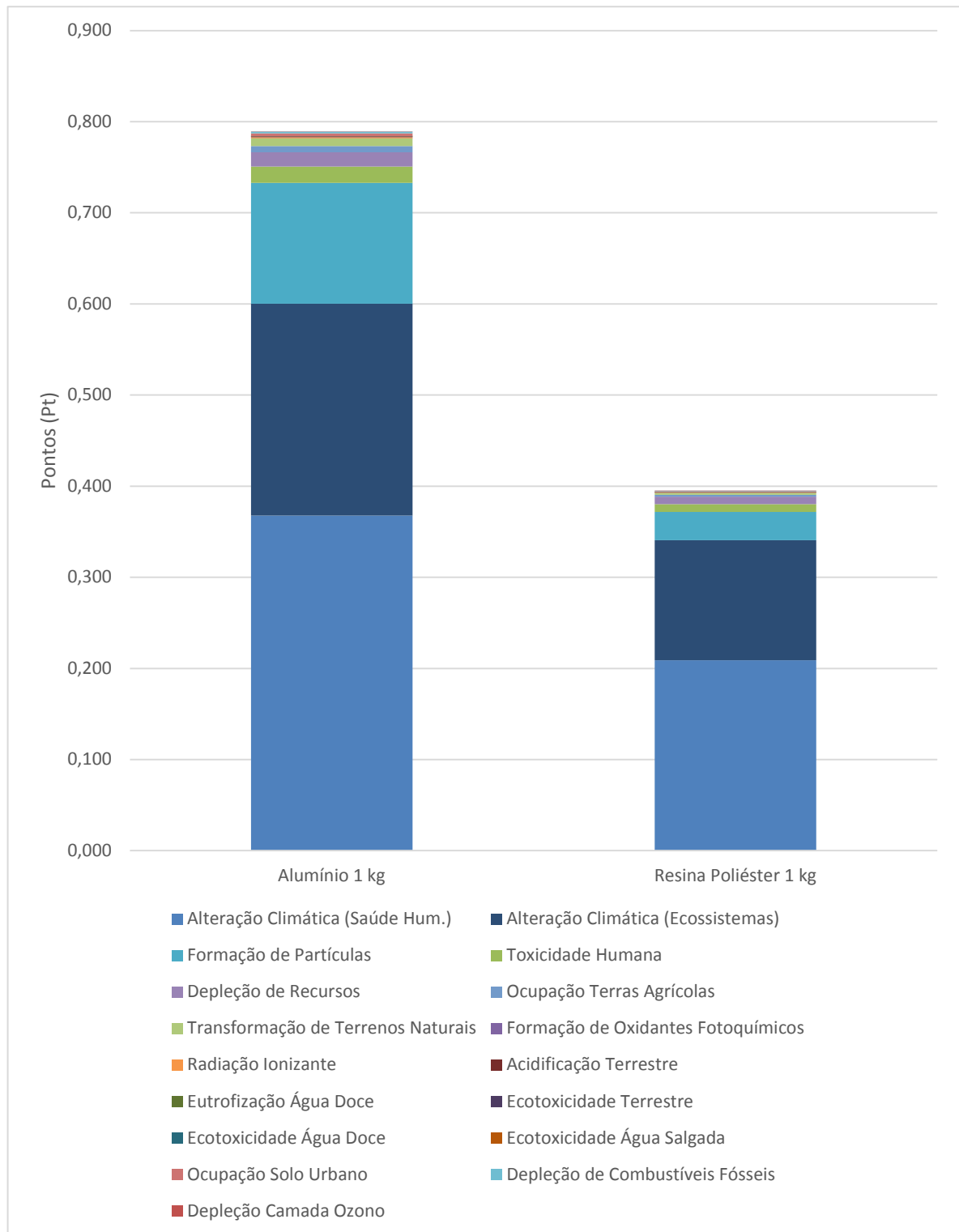


Figura 45 - Comparação entre a produção de 1 kg de alumínio e 1 kg de resina de poliéster não saturada, para as categorias de impacto ambiental intermédias, expressos em pontos (Pt)

A fase de Fabrico apresenta um impacto ambiental similar para ambos os módulos. A energia elétrica utilizada para a montagem dos módulos é a maior contribuidora para o impacto ambiental desta fase. Verificou-se que o módulo FEUPBUS permite uma redução dos tempos de montagem e, conseqüentemente, uma redução da energia elétrica, compreendendo-se assim que este módulo apresente um menor impacto ambiental para a fase de Fabrico.

A fase de Utilização dos produtos é caracterizada pela produção de diesel e pelas emissões gasosas associadas à combustão deste durante o tempo de vida do autocarro. Uma vez que, para a mesma distância percorrida, o módulo COBUS necessita de uma maior quantidade de diesel, justifica-se que este apresente um impacto superior no COBUS quando comparado com o FEUPBUS.

A Tabela 33 apresenta a contribuição das fases do ciclo de vida para cada categoria de impacto ambiental intermédia, expressa em Pontos (Pt). As células a vermelho assinalam as categorias de impacto ambiental que contribuem em mais de 95% para o impacto ambiental do ciclo de vida dos dois módulos e as células a laranja indicam qual é a fase que mais contribui para cada categoria do impacto ambiental. Verifica-se que para ambos os módulos as categorias de Alteração Climática (Saúde Humana), Formação de Partículas e Alteração Climática (Ecossistemas) são as que mais contribuem para o impacto ambiental do ciclo de vida, sendo que a fase que mais contribui para estas categorias é a fase de Utilização. Na base destas contribuições estão as emissões de dióxido de carbono na fase de Utilização dos produtos, no caso das categorias de Alteração Climática, e as emissões de óxidos de azoto na fase de Utilização no que diz respeito à categoria de Formação de Partículas.

Relativamente à fase de Extração das matérias-primas esta é a fase que mais contribui para 4 das categorias de impacto ambiental em ambos os produtos: Toxicidade Humana, Radiação Ionizante, Depleção de Recursos e Depleção de Combustíveis Fósseis. Com exceção da Toxicidade Humana, para todas as outras categorias o módulo COBUS apresenta um impacto ambiental superior. No caso da Toxicidade Humana, verifica-se que é o módulo FEUPBUS a apresentar um maior impacto (6,12 pontos), devido à libertação de arsénio para o ar na produção da fibra de vidro.

A fase de Fabrico é a fase que mais contribui para a categoria Ocupação de Terras Agrícolas em ambos os módulos. Na base desta contribuição está a utilização de madeira para o fabrico dos insertos, no caso do FEUPBUS, e o fabrico do papel para a laminite no caso do COBUS.

Verifica-se que para ambos os módulos existe um consenso relativamente às fases que mais contribuem para determinada categoria. A única exceção verificada é a categoria Ocupação Solo Urbano. Para o COBUS a fase que mais contribui para esta categoria é a fase de Extração das matérias-primas, e para o FEUPBUS a fase que mais contribui para esta categoria é a fase de Utilização. No caso do COBUS, o processo que mais contribui para esta categoria é a deposição de resíduos sulfurados, que são gerados na extração das matérias-primas que formam o alumínio, entendendo-se assim que a fase de Extração de matérias-primas seja a que mais contribua para esta categoria. No caso do FEUPBUS, o processo que mais contribui para esta categoria é a extração de petróleo necessário à produção do diesel, justificando-se assim que a fase de Utilização seja a que mais contribui para esta categoria de impacto ambiental.

Tabela 33 - Contribuição das fases do ciclo de vida para as categorias de impacto ambiental, expresso em Pontos

	Total		Matérias-Primas		Fabrico		Utilização	
	FEUPBUS	COBUS	FEUPBUS	COBUS	FEUPBUS	COBUS	FEUPBUS	COBUS
Alteração Climática (Saúde Hum.)	328,6	425	47	109,4	13,3	14,6	269	301,0
Depleção Camada Ozono	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,002	0,06	0,1
Toxicidade Humana	8,7	8,5	6,12	5,5	0,5	0,5	2,1	2,4
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	0,1	0,1	0,004	0,01	0,001	0,002	0,08	0,1
Formação de Partículas	135,5	181	10	39,4	4,7	6,2	121	135,3
Radiação Ionizante	0,2	0,4	0,10	0,35	0,003	0,01	0,05	0,1
Alteração Climática (Ecossistemas)	207,6	268,5	29	69,1	8,4	9,2	170	190,1
Acidificação Terrestre	0,9	1,2	0,07	0,2	0,04	0,04	0,8	0,9
Eutrofização Água Doce	0,003	0,02	0,001	0,015	0,0003	0,001	0,001	0,0013
Ecotoxicidade Terrestre	0,37	0,4	0,06	0,1	0,03	0,03	0,2	0,3
Ecotoxicidade Água Doce	0,01	0,009	0,001	0,002	0,0004	0,0002	0,01	0,007
Ecotoxicidade Água Salgada	0,003	0,004	0,0005	0,001	0,0001	0,0002	0,002	0,002
Ocupação Terras Agrícolas	1,2	5,6	0,4	2,0	0,7	3,5	0,10	0,1
Ocupação Solo Urbano	0,9	1,9	0,3	1,0	0,1	0,2	0,6	0,7
Transformação de Terrenos Naturais	17,1	21,2	0,5	2,6	0,2	0,4	16,3	18,2
Depleção de Recursos	2,0	5,9	1,6	5,0	0,1	0,4	0,36	0,4
Depleção de Combustíveis Fósseis	0,2	0,7	0,1	0,6	0,03	0,1	0,05	0,1
TOTAL	703	920	95,3	235	28,2	35,3	580	650

7.2.4 Comparação dos resultados obtidos com os resultados disponíveis na bibliografia

Os resultados obtidos permitem concluir que a fase de Utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental de ambos os módulos. Os estudos revistos que dizem respeito à avaliação do ciclo de vida de componentes em sistemas compósitos na indústria automóvel (Song *et al.* (2009) e Witik *et al.* (2011)) afirmam também que a fase de Utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental do produto. No entanto, não é possível obter uma comparação, uma vez que não foi encontrado nenhum estudo que apresentasse os resultados de impacto ambiental que tivessem sido obtidos pelo método aqui utilizado – ReCiPe 2008.

O estudo de Song *et al.* (2009) afirma que a maior redução do consumo de energia é conseguida na fase de utilização do produto. O estudo de Witik *et al.* (2011) afirma que a fase de Utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental, tendo-se verificado uma redução do impacto ambiental associado a esta fase nos produtos compósitos. Este estudo considera quatro indicadores de impacto ambiental – Alteração Climática, Recursos, Qualidade dos Ecossistemas e Saúde Humana – sendo que o compósito de fibra de vidro e resina de poliéster não saturada foi o que apresentou um menor impacto para os quatro indicadores considerados. Os resultados obtidos no presente trabalho demonstram também que para as indicadores de impacto ambiental finais consideradas – Recursos, Qualidade dos Ecossistemas e Saúde Humana – o compósito de fibra de vidro e resina de poliéster não saturada apresenta o menor impacto.

No que diz respeito à fase de Extração e produção das matérias-primas, os estudos de Song *et al.* (2009) e Simões *et al.* (2012) afirmam que a produção do alumínio apresenta um maior impacto ambiental quando comparada com a produção dos materiais que integram os componentes compósitos. Também nos resultados aqui obtidos se verifica o mesmo, verificando-se uma redução de 60% do impacto ambiental na fase de Extração e produção das matérias-primas.

7.3 Solução otimizada da carroçaria em sistemas compósitos

A carroçaria em alumínio, que integra o autocarro COBUS, foi dimensionada para integrar um autocarro de aeroporto. No que diz respeito à carroçaria do FEUPBUS, esta foi dimensionada para integrar um autocarro urbano estando, por isso, sobredimensionada quando comparada com as exigências que o COBUS deve suportar. Assim, foram efetuadas simulações com o intuito de estudar a resposta da estrutura compósita quando sujeita a solicitações similares às sujeitas pelo COBUS. Esta nova carroçaria em sistemas compósitos será designada por FEUPBUS versão 2.

As simulações foram realizadas com recurso ao *software* Abaqus/CAE versão 6.12. A estrutura foi modelada em elementos finitos como sendo uma casca. A malha é formada por elementos quadrangulares e foi efetuada no *software* Ansa, para que fosse possível obter uma malha uniforme e com um baixo grau de distorção. As simulações foram efetuadas sobre o módulo da carroçaria e o laminado utilizado é igual ao do FEUPBUS, tendo as suas propriedades sido apresentadas na Tabela 17 e Tabela 18. Analisa-se o comportamento da estrutura quando sujeita a uma aceleração vertical de 3g, simulando o efeito da passagem por uma lomba. Considera-se a ocupação do autocarro com passageiros, sendo que a ocupação máxima é igual à do COBUS, ou seja, 6 pessoas por metro quadrado. Considera-se também a existência de uma massa de 100 kg no topo da estrutura, que representa o sistema de ar condicionado.

Para avaliar a propagação do dano na estrutura foi utilizado o critério de Hashin (1980). Tal como revisto na secção 3.4, o critério de Hashin considera separadamente a falha da fibra e da matriz, à tração e à compressão. Os valores para o início de propagação do dano foram os mesmos estabelecidos para o FEUPBUS (Almeida, 2013), sendo eles:

Tabela 34 - Valores para o início de propagação de dano considerados (Almeida, 2013)

	Designação	Valor
Tensão de cedência à tração na direção longitudinal (MPa)	Xt	700
Tensão de cedência à compressão na direção longitudinal (MPa)	Xc	500
Tensão de cedência à tração na direção transversal (MPa)	Yt	30
Tensão de cedência à compressão na direção transversal (MPa)	Yc	100
Tensão de corte (MPa)	S	40

A Figura 46 apresenta o módulo considerado e a Figura 47 apresenta os apoios e a aceleração ao qual o módulo é sujeito.

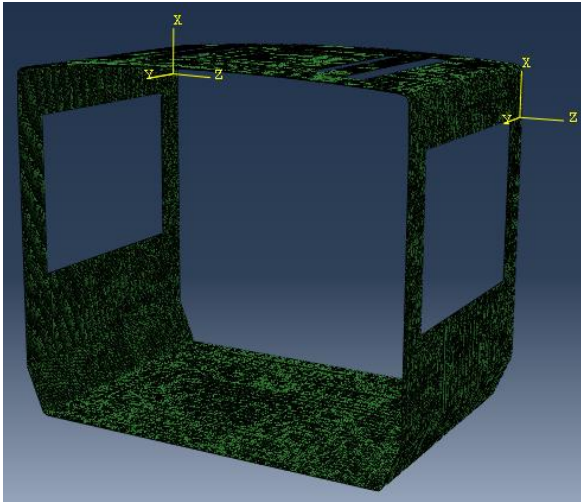


Figura 46 – Módulo considerado

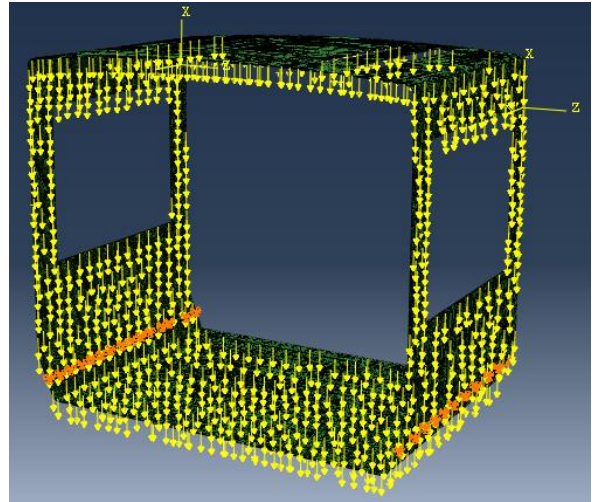


Figura 47 - Representação dos apoios e da aceleração à qual o módulo está sujeito

A solução otimizada da carroçaria em sistemas compósitos, o FEUPBUS versão 2, é constituída por um laminado de fibra de vidro com resina de poliéster não saturada de 10 camadas orientadas a $\pm 20^\circ$ e um núcleo de PVC de 30 mm de espessura. Os resultados obtidos para o início de propagação de dano podem ser consultados no Anexo E: Resultados das simulações para o FEUPBUS versão 2. Apresentam-se os resultados para a propagação de dano das fibras à tração (HSNFTCRT), das fibras à compressão (HSNFCCRT), da matriz à tração (HSNMTCRT) e da matriz à compressão (HSNMCCRT), sendo que o valor de “1” corresponde ao início de propagação de dano.

A massa final deste módulo da carroçaria é de 189 kg. Esta solução encontra-se, no entanto, no limite do início de propagação de dano, uma vez que já se verifica ocorrência de dano na matriz à compressão. Como esta propagação de dano se encontra numa zona localizada (o chão), optou-se por incluir um reforço de laminado com 1 mm de espessura nessa zona, em ambos os lados da estrutura em sanduíche. As figuras seguintes (Figura 48, Figura 49, Figura 50 e Figura 51) apresentam os resultados obtidos para o início de propagação de dano nas fibras e na matriz à tração e à compressão, considerando o reforço. A massa final do módulo FEUPBUS versão 2 é assim de 198 kg, após a inclusão do reforço, verificando-se uma redução de cerca de 45% do peso face ao módulo FEUPBUS original.

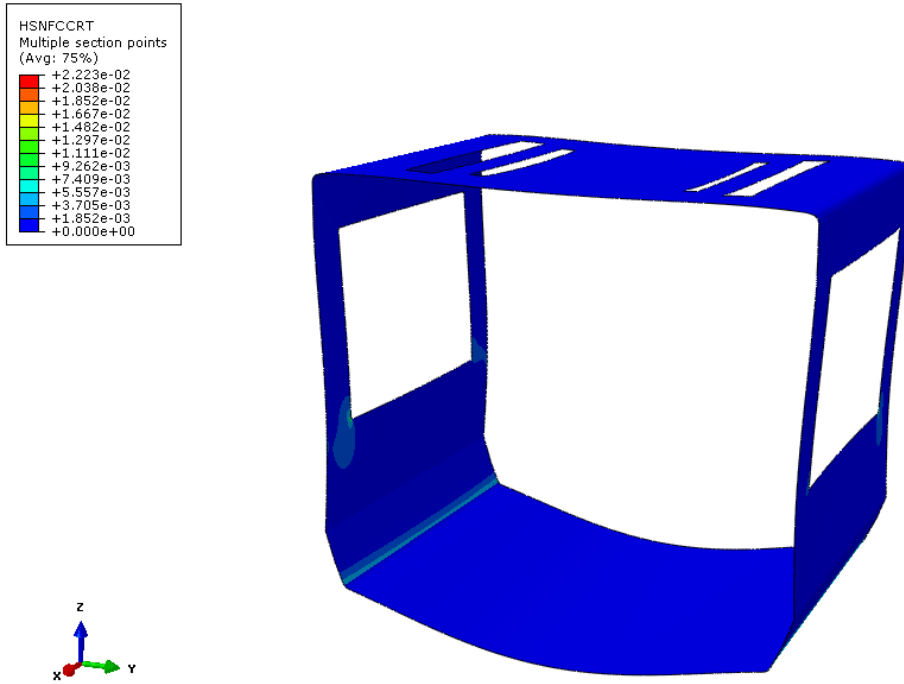


Figura 48 - Propagação do dano das fibras à compressão (HSNFCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

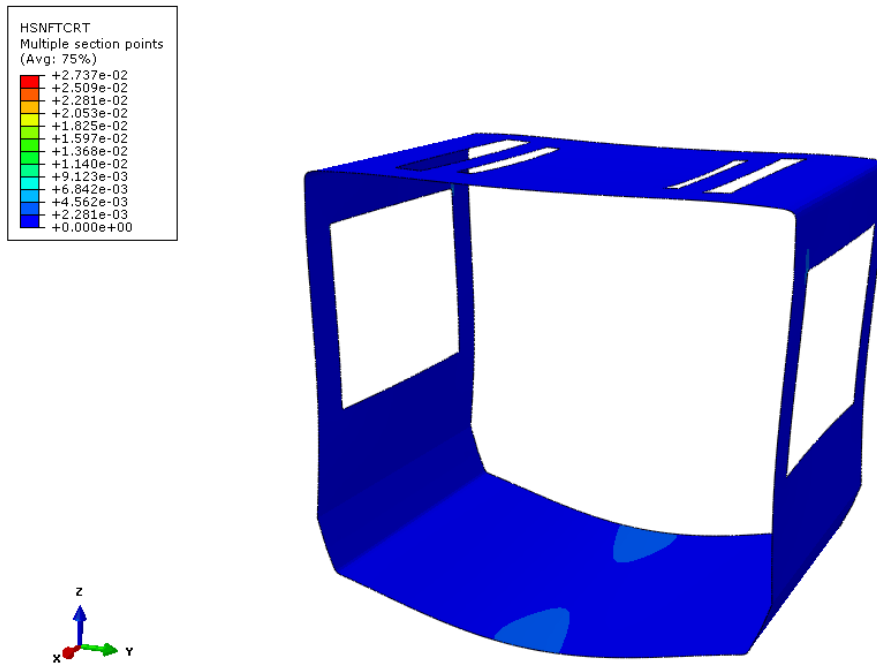


Figura 49 - Propagação do dano das fibras à tração (HSNFTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

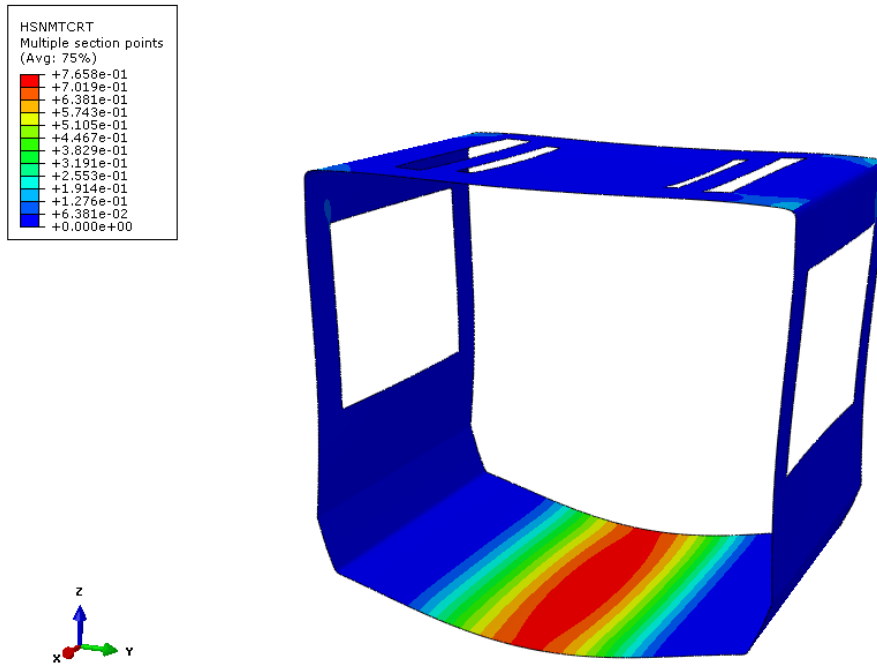


Figura 50 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

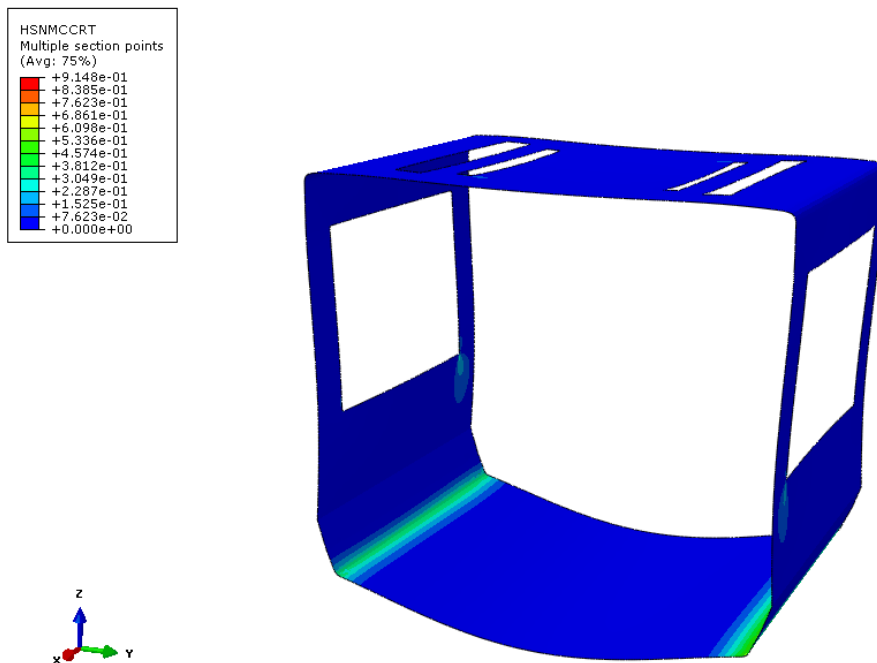


Figura 51 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

As outras situações de carregamento às quais o COBUS está sujeito são o efeito de uma curva - aceleração de 1,25g lateral - e de uma travagem - aceleração de 0,75g longitudinal. Foram efetuadas simulações para estudar o comportamento da estrutura compósita quando sujeita a estas sollicitações. Os resultados encontram-se no Anexo E: Resultados das simulações para o FEUPBUS versão 2, e a Tabela 35 apresenta os valores máximos obtidos para todos os índices de propagação de dano, para as simulações efetuadas. Verifica-se que para o FEUPBUS versão 2 com reforço nunca se verifica início de dano para nenhuma das sollicitações às quais está sujeito.

Tabela 35 – Valores máximos obtidos para os critérios de propagação de dano de Hashin, para as simulações efetuadas (FEUPBUS versão 2)

Solicitação		Critérios de Hashin			
		Fibras à tração	Fibras à compressão	Matriz à tração	Matriz à compressão
Sem reforço	Vertical 3g	0,04	0,02	2,36	2,16
Com reforço	Vertical 3g	0,02	0,02	0,91	0,76
	Lateral 1,25g	0,0004	0,009	0,009	0,02
	Longitudinal 0,75g	0,01	0,02	0,77	0,95

7.4 Comparação dos resultados com os obtidos anteriormente

Foi efetuada uma nova avaliação do ciclo de vida sobre a carroçaria compósita, para a solução otimizada da carroçaria designada por módulo FEUPBUS versão 2. O inventário do ciclo de vida deste módulo é similar ao do FEUPBUS, havendo apenas alterações na quantidade de matérias-primas necessárias, na energia dispendida no enrolamento filamentar, na quantidade de *diesel* necessária e das emissões associadas à combustão do mesmo. A Tabela 36 apresenta as alterações efetuadas ao inventário do FEUPBUS, considerando-se o novo módulo. As emissões gasosas associadas à combustão do *diesel* para a fase de utilização foram calculadas usando os fatores de emissão disponibilizados pelo EMEP/EEA (2009).

Tabela 36 – Alterações efetuadas ao inventário do ciclo de vida do FEUPBUS

MATÉRIAS-PRIMAS	ENTRADAS			
	Material	Designação da base de dados utilizada	Quantidade	Unid.
	Fibra de vidro	<i>Glass fibre, at plant RER, U</i>	102,2	kg
	Resina de poliéster não saturada	<i>Polyester resin, unsaturated, at plant RER, U</i>	78,3	kg
Espuma rígida de poliuretano	<i>Polyurethane, rigid foam, at plant RER, U</i>	7	kg	
FABRICO	ENTRADAS			
	Processo	Designação da base de dados utilizada	Quantidade	Unid.
	Enrolamento Filamentar	<i>Electricity, medium voltage, production PT, at grid PT, U</i>	89	kWh
UTILIZAÇÃO	ENTRADAS			
	Material	Designação da base de dados utilizada	Quantidade	Unid.
	<i>Diesel</i>	<i>Diesel, at refinery RER, U</i>	1414,7	kg
	SAÍDAS			
	Origem	Poluentes	Quantidade	Unid.
	<i>Diesel</i>	CO	10,7	kg
		NM VOC	2,7	kg
		NO _x	47,2	kg
		PM	1,3	kg
		N ₂ O	0,07	kg
		NH ₃	0,02	kg
		ID (1,2,3-cd)P	1,1E-05	kg
		B(k)F	4,9E-05	kg
B(b)F		4,4E-05	kg	
B(a)P		7,2E-06	kg	
Pb		7,4E-06	kg	
CO ₂		4442,3	kg	

7.4.1 Resultados da Caracterização

A Figura 52 apresenta os resultados comparativos da Caracterização para os três módulos em estudo. O FEUPBUS versão 2 apresenta um melhor desempenho ambiental para todas as categorias de impacto ambiental. O FEUPBUS versão 2 apresenta uma redução sempre superior a 51% para quase todas as categorias de impacto ambiental, quando comparado com o COBUS. A única exceção verificada é a categoria de Toxicidade Humana, onde o FEUPBUS versão 2 apresenta uma redução de 41% face ao COBUS.

Quando comparado com o módulo original do FEUPBUS, o FEUPBUS versão 2 apresenta uma redução do impacto ambiental quase sempre superior a 41%. A única exceção verificada é para a categoria de Ocupação Terras Agrícolas, em que o FEUPBUS versão 2 apresenta uma redução de 21%. Justifica-se que a redução nesta categoria de impacto ambiental não seja tão acentuada, pois a fase de de Fabrico é a fase que mais contribui para esta categoria no módulo FEUPBUS e esta fase praticamente não sofre alterações quando se considera o FEUPBUS versão 2.

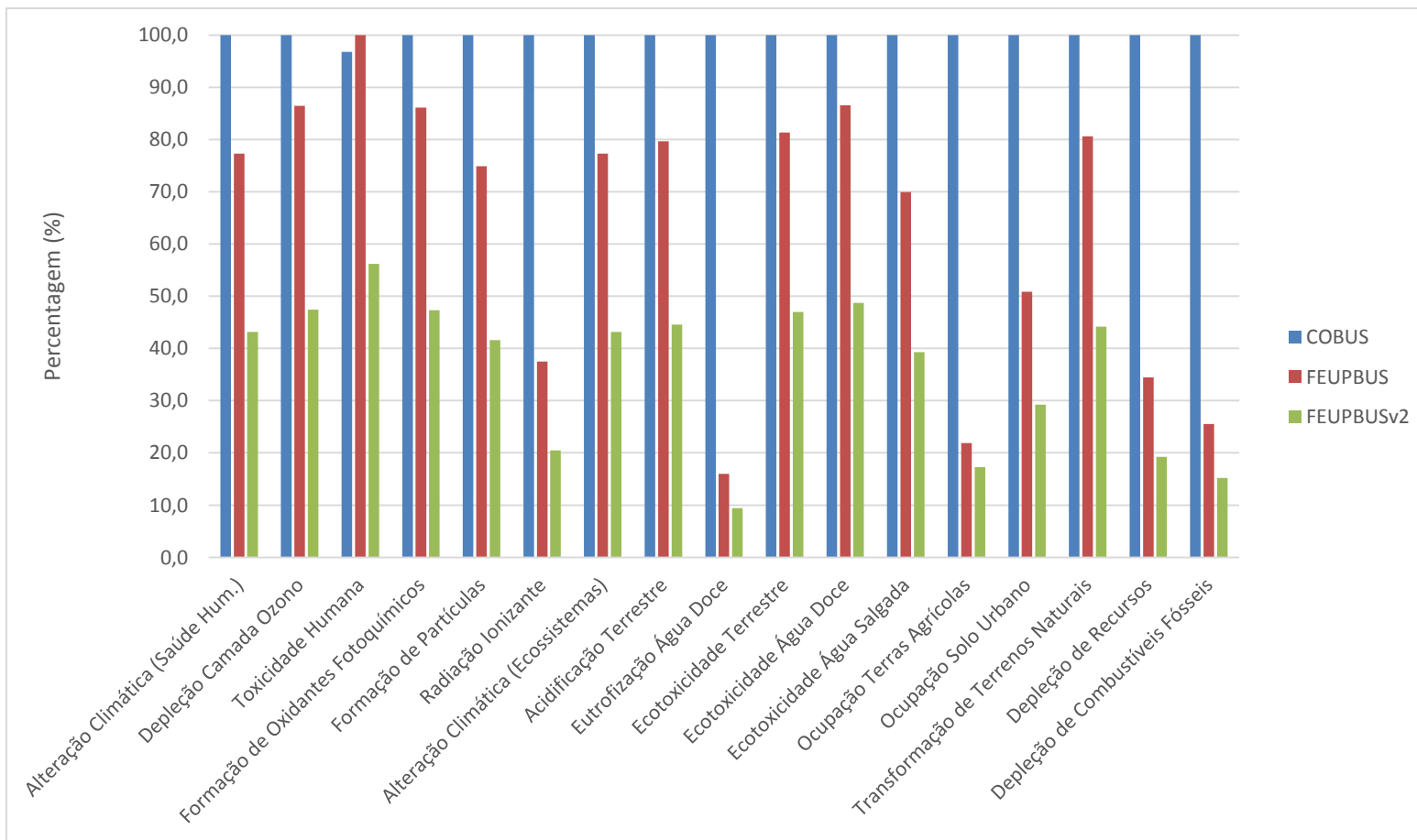


Figura 52 - Resultados comparativos da etapa de Caracterização para os três módulos em estudo

7.4.2 Resultados da Ponderação

A Figura 53 apresenta a comparação entre os três módulos para as categorias de impacto ambiental designadas por *endpoint* (finais). Aqui as categorias de impacto ambiental anteriores são agrupadas em três grandes categorias: Saúde Humana, Recursos e Ecossistemas.

A Saúde Humana é o indicador final onde mais se reflete o impacto ambiental dos módulos, seguida dos Ecossistemas. O FEUPBUS versão 2 é o módulo que apresenta o menor impacto ambiental para os três indicadores, verificando-se uma redução de 57% face ao COBUS e de 44% face ao módulo original do FEUPBUS.

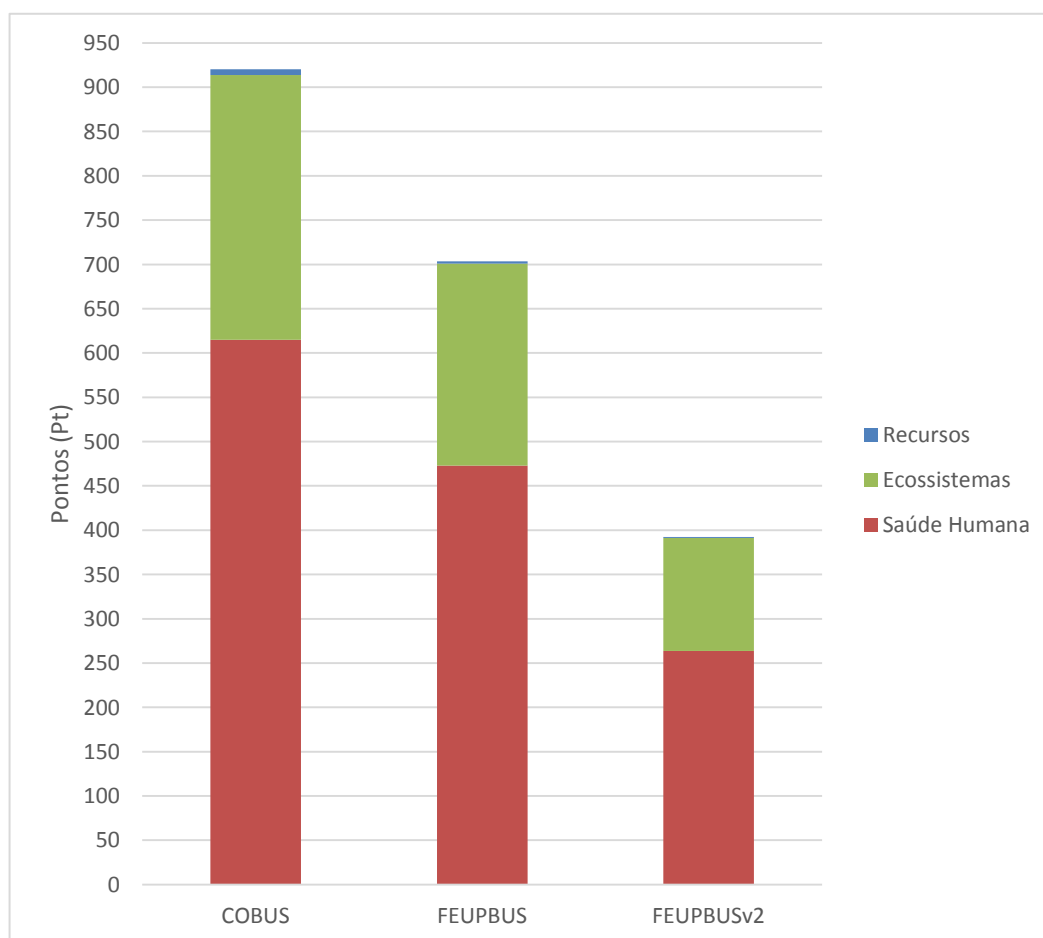


Figura 53 - Comparação entre os três módulos em estudo, para as categorias de impacto ambiental *endpoint*, expresso em pontos (Pt)

A Figura 54 apresenta a comparação entre os três módulos para cada fase do ciclo de vida consideradas. Verifica-se uma redução do impacto ambiental para as três fases do ciclo de vida consideradas. A fase de Utilização é a fase que apresenta uma maior redução do impacto ambiental, verificando-se uma redução de cerca de 46% face ao módulo original FEUPBUS.

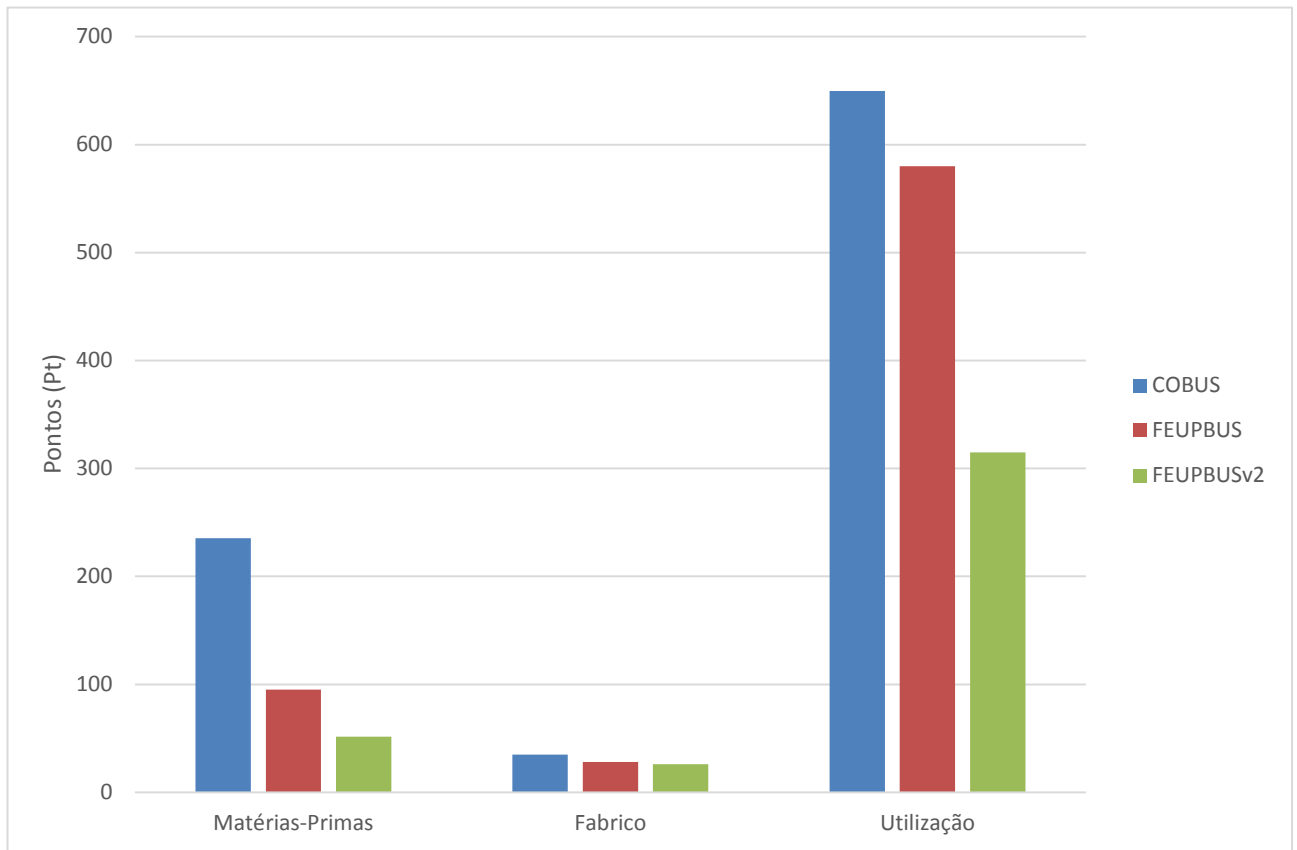


Figura 54- Comparação entre os três módulos, em pontos (Pt) para cada fase do ciclo de vida considerada para as categorias de impacto ambiental *endpoint*, expresso em Pontos (Pt)

8. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES DO TRABALHO REALIZADO E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos permitem concluir que o módulo designado por FEUPBUS apresenta um menor impacto ambiental quando comparado com o módulo COBUS. A fase de Utilização é a fase que mais contribui para o impacto ambiental em ambos os módulos. Isto deve-se às emissões de dióxido de carbono e óxidos de azoto na combustão do *diesel* para a utilização dos autocarros. O COBUS apresentou um impacto ambiental superior para as três fases do ciclo de vida consideradas (Extração e produção das matérias-primas, Fabrico, Utilização). No que diz respeito às categorias de impacto ambiental intermédias (*midpoint*), a categoria Alteração Climática (Saúde Humana) é a que apresenta um maior impacto, seguida das categorias Formação de Partículas e Alteração Climática (Ecossistemas). Na base desta contribuição está a emissão de dióxido de carbono e de óxidos de azoto na fase de Utilização dos produtos. Relativamente às categorias de impacto ambiental finais (*endpoint*), a categoria Saúde Humana é a que apresenta um maior impacto ambiental, seguida da categoria Ecossistemas e Recursos. A categoria intermédia Alteração Climática (categoria que apresenta o maior impacto ambiental para ambos os módulos) contribui para os indicadores finais Saúde Humana e Ecossistemas, justificando assim que estes indicadores finais apresentem um maior impacto ambiental. A categoria intermédia Formação de Partículas, a segunda maior contribuidora para o impacto ambiental de ambos os módulos, contribui para o indicador final Saúde Humana. Justifica-se assim que a Saúde Humana seja o indicador final que mais contribui para o impacto ambiental de ambos os módulos. Uma vez que na base das contribuições para as categorias de Alteração Climática e Formação de Partículas está a emissão de dióxido de carbono e óxidos de azoto na fase de Utilização dos produtos, é possível concluir que esta é a fase que apresenta uma maior contribuição para o indicador final Saúde Humana.

Outras conclusões revelam que uma substituição da carroçaria em alumínio por compósitos leva a uma diminuição do impacto ambiental do produto para as três fases do ciclo de vida consideradas. Na base desta diminuição destacam-se três aspetos. Em primeiro lugar, para fabricar um módulo com as mesmas dimensões a utilização de sistemas compósitos apresenta-se como uma solução mais leve, tendo-se verificado uma redução de peso na ordem dos 11% do COBUS face ao FEUPBUS. Esta diminuição do peso tem como consequência uma diminuição da quantidade de combustível utilizada ao longo do ciclo de vida e, conseqüentemente, uma diminuição das emissões de dióxido de carbono e de óxidos de azoto, emissões estas que se apresentam como sendo as maiores contribuidoras para o impacto ambiental do produto.

O segundo aspeto que contribui para a diminuição do impacto ambiental quando são utilizados os sistemas compósitos, é o facto dos materiais selecionados apresentarem um menor impacto ambiental na sua produção quando comparados com o alumínio. Verificou-se que para a produção de 1 kg de matéria-prima, a produção de alumínio apresenta um impacto ambiental superior à produção da resina de poliéster. Para além disso, a quantidade de materiais necessária para a produção do módulo em compósitos é menor à quantidade necessária de alumínio, justificando-se assim que o módulo em alumínio apresente um impacto ambiental superior no que diz respeito à fase de Extração e produção das matérias-primas.

Por fim, o fabrico do módulo em sistemas compósitos através do processo de enrolamento filamentar permite a construção de uma estrutura integrada, reduzindo-se assim o número de componentes. Esta redução do número de componentes conduziu a uma redução dos tempos necessários à montagem na fase de Fabrico e, conseqüentemente, da energia dispendida nesta fase. Posto isto, justifica-se assim que o módulo em alumínio apresente um maior impacto ambiental na fase de Fabrico, uma vez que dispende mais energia no processo de montagem.

O trabalho realizado permite afirmar que os sistemas compósitos se apresentam como uma alternativa promissora na indústria dos transportes, principalmente devido à redução de emissões na utilização dos veículos.

Este trabalho apresenta no entanto algumas limitações que se consideram necessárias referir. A maior limitação associada à realização deste trabalho é o facto da qualidade dos resultados obtidos depender dos dados disponíveis. Muitas das vezes os dados necessários não estavam disponíveis e, quando estavam, não era possível determinar a sua qualidade (como por exemplo a sua fonte e grau de atualização). As bases de dados do SimaPro mostraram-se como sendo extremamente úteis para contornar esta situação, no entanto estas não são específicas para os tipos de materiais (tipo da fibra de vidro, tipo da resina, liga do alumínio) utilizados nos módulos das carroçarias.

Outra questão que tem influência nos resultados obtidos é o facto de não se ter considerado a fase de fim de vida na modelização do ciclo de vida dos dois módulos. Esta fase foi desconsiderada uma vez que a informação relativamente à mesma é deficiente. Contudo, sabe-se que a reciclagem do alumínio está largamente difundida atualmente, ao passo que a reciclagem dos sistemas compósitos, apesar de possível, apresenta todavia algumas dificuldades. Considerado a deposição em aterro como o cenário mais comum para os sistemas compósitos, tal como afirmado por Moura *et al.* (2005) e Song *et al.* (2009), e considerando que o alumínio é reciclado, os resultados poderão ser afetados. Alguns autores afirmam que a reciclagem do alumínio poderá compensar em parte o impacto ambiental do mesmo (Song *et al.* (2009), Simões *et al.* (2012)).

Por fim, o dimensionamento de ambas as estruturas (em alumínio e em sistemas compósitos) tem também influência nos resultados obtidos. Verificou-se que quando a estrutura em sistemas compósitos é dimensionada para integrar um autocarro de aeroporto similar ao COBUS, o peso da estrutura diminui em cerca de 45%, o que afeta os resultados da avaliação do ciclo de vida. Verificou-se uma redução de 57% face ao COBUS e de 44% face ao módulo original do FEUPBUS no impacto ambiental global.

Como trabalhos futuros sugerem-se várias possibilidades associadas a uma maior especificidade na representação da realidade associadas aos materiais usados nas carroçarias e à inclusão de outros componentes que formam a carroçaria do autocarro. Uma das possibilidades seria considerar a espuma de PVC como material para o núcleo da estrutura em sanduíche. Devido às limitações das bases de dados disponíveis foi selecionada uma espuma de poliuretano para o núcleo da estrutura em sanduíche compósita. Esta decisão tem, no entanto, uma influência nos resultados obtidos, sendo que apenas um estudo considerando a espuma de PVC ao invés de poliuretano, permitirá obter conclusões sobre a influência desta escolha.

Um dos problemas frequentemente associado ao processo de infusão de resina é a má impregnação da peça, podendo existir zonas que não ficam totalmente impregnadas. Para contornar este problema sugere-se uma sequência de fabrico alternativa à proposta neste trabalho: ao invés de se realizar o enrolamento a seco seguido do processo RTM, sugere-se efetuar o enrolamento a seco da primeira camada e efetuar a infusão de resina, e só depois se proceder ao enrolamento da segunda camada e a infusão de resina da mesma. Desta forma, contorna-se o problema da má impregnação de algumas zonas. Este tipo de solução será, contudo, mais dispendioso do ponto de vista energético, uma vez que será necessário efetuar duas vezes o processo de infusão de resina e poderá necessitar de mais material não recuperável. Uma nova avaliação do ciclo de vida tendo em conta estas alterações seria interessante de modo a ser possível avaliar as alterações do impacto ambiental referente à fase de fabrico.

Por fim, sugere-se também a análise da possibilidade de inclusão do chassis na estrutura compósita obtida por enrolamento filamentar. Na realização deste trabalho considerou-se que a carroçaria obtida por enrolamento filamentar é fixada sobre o chassis já existente, que não é

mais do que um conjunto de perfis ocós estruturais soldados e conformados a frio de aço não ligado. Esta operação é levada a cabo pela CaetanoBus, S.A., em que os perfis ocós são fabricados por soldadura, sem tratamento térmico posterior. A sugestão de incluir o chassis na carroçaria compósita prende-se assim em duas razões:

- Eliminação das operações de soldadura, uma vez que estas têm sempre riscos ambientais associados;
- Diminuição ainda mais relevante do peso do veículo, uma vez que toda a estrutura em aço seria substituída por sistemas compósitos.

REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

- Agency, European Environment. , 2012. *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2012. Tracking progress towards Kyoto targets.*
- Almeida, Pedro Miguel , 2013. "FEUP BUS/CIVITAS", Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto.
- Anderson, Jane , Antonia Jansz, Kristian Steele e Paul Thistlethwaite. , 2004. *Green guide to composites: an environmental profiling system for composite materials and products.* BRE Bookshop.
- Beckwith, Scott W., 2008. *Filament Winding vs. Fiber Placement Manufacturing Technologies.* SAMPE Journal. <http://www.btgcomposites.com/documents/FWvsFPTechnology---Mar-Apr08Col.pdf>.
- Belbute, Pedro Miguel Grifo. , 2010. "Estudo do Comportamento em Flexão de Vigas Compósitas Sandwich", Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Aeroespacial, Instituto Superior Técnico Lisboa.
- Bhattacharya, A. e B. N. Misra. , 2004. "Grafting: a versatile means to modify polymers: Techniques, factors and applications." *Progress in Polymer Science* no. 29 (8):767-814.
- Black, Sara. , 2013. "Structural preform technologies emerge from the shadows." *Composites Technology, Features.* <http://www.compositesworld.com/articles/structural-preform-technologies-emerge-from-the-shadows>.
- Brosius, Dale. , 2014. "Out-of-autoclave manufacturing: the green solution." *High Performance Composites, Composites: Perspectives & Provocations*:11. <http://www.compositesworld.com/articles/out-of-autoclave-manufacturing-the-green-solution>.
- Broughton, W.R., Crocker, L. E., Gower, M., 2002. *Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures.* NPL Materials Centre: National Physical Laboratory, Teddington.
- Campbell, F. C., 2004. *Manufacturing processes for advanced composites.* Elsevier.
- D. V. Rosato, C. S. Grove, Jr. 1964. *Filament Winding: its development, manufacture, applications, and design.* Interscience Publishers.
- Das, Sujit. , 2001. *The cost of automotive polymer composites: a review and assessment of doe's lightweight materials composites research.* Oak Ridge National Laboratory.
- Davies, J. 2001. *Lightweight Sandwich Construction.* Editado por Blackwell Science Ltd.
- DieselNet. , 2014. "Reference Diesel Fuel". Acedido a Maio de 2014. https://www.dieselnets.com/standards/eu/fuel_reference.php.
- Diretiva 2000/53/CE 2000.
- EMEP/EEA. 2009. *1.A.3.b - Road Transport (Combustion). In Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2009.* Copenhaga, Dinamarca: European Environmental Agency.
- Fernandes, A.A., Ferreira, A., Neves, P.C., 2009. "LiteBus Modular Lightweight Sandwich Bus Concept."
- Ferrão, Paulo Cadete. ,2009. , *Ecologia Industrial - Princípios e Ferramentas.* IST Press.
- FEUP, ADN. , 2012. "Civitas-Bus: FEUP testa protótipo gratuito na Asprela". Acedido a Fevereiro 2014. http://paginas.fe.up.pt/~adn/index.php?option=com_k2&view=item&id=230:civitas-bus-feup-testa-prot%C3%B3tipo-gratuito-na-asprela&Itemid=56.
- Fiberglass, CPIC. Acedido a Fevereiro 2014. <http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=7&cat=Processos>.

- Gardiner, Ginger. , 2014. "Resin-infused MS-21 wings and wingbox." *High-Performance Composites*. <http://www.compositesworld.com/articles/resin-infused-ms-21-wings-and-wingbox>.
- GlassFibreEurope. , 2012. *Life cycle assessment of CFGF - Continuous Filament Glass Fibre Products*.
- Goedkoop, Mark, Reinout Heijungs, An De Schryver, Jaap Struijs e Rosalie van Zelm. 2013. *ReCiPe 2008 - A life cycle assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*.
- GrantaDesign. , 2013. *CES EduPack*.
- Guinée, Jeroen. , 2004. *Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO standards*. Kluwer Academic Publishers.
- Halliwell, Sue. , 2006. *End of life options for composites waste: recycle, reuse or dispose?: National Composites Network*.
- Hunt, Richard. , 2009. "2009 CompoBus Update". Acedido a Fevereiro de 2014. http://media.metro.net/board/Items/2009/09_september/20090902OtherSectorSFVItem6.pdf.
- Hydro. , 2013. "From alumina to aluminium". Acedido a Abril de 2014. <http://www.hydro.com/en/About-aluminium/Aluminium-life-cycle/Primary-production/>.
- ISO. , 2008. *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework (NP EN ISO 14040:2008)*.
- Marques, A. T., 2013. *Apontamentos da disciplina de Materiais Compósitos*: FEUP.
- Mazumdar, Sanjay K. 2002 *Composites manufacturing: materials ,product and process engineering*. CRC Press.
- Moura, Marcelo F.S.F; Morais, Alfredo B.; Magalhães, António G. , 2005. *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Editado por Edicções Técnicas Publindústria.
- NZIC. , 1998. "Polyesters for use in the fibreglass industry ". Acedido a Março 2014. <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/polymers/10B.pdf>.
- Parente, João. , 2008. *Energy Management: 2007/2008*. Instituto Superior Técnico.
- Pennington, D. W., J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliet, T. Rydberg e G. Rebitzer. , 2004. "Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice." *Environment International* no. 30 (5):721-739.
- Pickering, S. J., 2006. "Recycling technologies for thermoset composite materials—current status." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* no. 37 (8):1206-1215.
- Pinho, Silvestre Taveira. , 2005. Critérios de rotura em Materiais Compósitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PRé-Consultants. , 2011. *SimaPro*.
- Rebitzer, G., T. Ekvall, R. Frischknecht, D. Hunkeler, G. Norris, T. Rydberg, W. Schmidt, S. Suh, B. Weidema e D. Pennington. , 2004. "Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications." *Environment International* no. 30 (5):701-720.
- Ribeiro, C.; Ferreira, JV.; Partidário, P., 2007. *Life Cycle Assessment of a Multi-Material Component Car*. Int J LCA.
- Rudd, C.D., A.C. Long, K.N. Kendall e C.G. Mangin. , 1997. *Liquid Moulding Technologies: Resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques*. Woodhead Publishing Limited.
- Simões, Carla, Lígia M. Pinto e C. A. Bernardo. , 2012. "Modelling the environmental performance of composite products: Benchmark with traditional materials." *Materials & Design* no. 39 (0):121-130.

- Song, Xiaolan. , 2003. "Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification", Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Song, Young S., Youn, Jae R., Gutowski, Timothy G., 2009. "Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* no. 40 (8):1257-1265.
- Subic, Aleksandar, Schiavone, Francesco. , 2006. *Design-oriented application of LCA to an automotive system*. 5th Australian Conference on Life Cycle Assessment: RMIT University.
- Valero, Daniel L pez, Christoph Mader, Thomas Schmidt, Rafal Juszczak e Irma Fakjovic. , 2014. "Second-generation PIMC: powder in-mould-coatings with internal mould release properties." *JET Composites*.
- Vigon, B.W., D.A. Tolle, B.W. Cornaby e H. C. Latham. , 1994. *Life cycle assessment: Inventory Guidelines and Principles* Lewis Publishers.
- Witik, Robert A., Fabrice Gaille, R my Teuscher, Heike Ringwald, V ronique Michaud e Jan-Anders E. M nson. , 2012. "Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components." *Journal of Cleaner Production* no. 29–30 (0):91-102.
- Witik, Robert A., J r me Payet, V ronique Michaud, Christian Ludwig e Jan-Anders E. M nson. , 2011. "Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* no. 42 (11):1694-1709.
- Yang, Lau, Puckett, Mac. , 2002. *Making High Performance Unsaturated Polyester Resins with 2-Methyl-1,3-Propanediol*. Lyondell Chemical Company. <http://www.lyondellbasell.com/techlit/techlit/2262.pdf>.

ANEXO A: LISTA DE COMPONENTES**Anexo A1: Lista de componentes do módulo COBUS****Tabela A 1 – Lista de componentes do módulo COBUS**

Código	Qt.	Designação	Material	Massa (kg)
AG 4833-03	22	Canto	Al	3,32
110979 (204608)	132	Perfil de aperto do canto	Al	2,24
Cobolt (204610)	124	Parafuso de aperto do canto	Aço	1,24
41353501	1	Travessa central tecto	Al	5,95
51256108_CS	1	Travessas tecto	Al	15,545
41353403	1	Sanca E	Al	20,85
41353404	1	Sanca D	Al	20,85
Perfil Pav. Al 2690	6	Painéis chão	Al	144,71
-	6	Revestimento do chão	Borracha	12,37
51618101	2	Revestimento inferior	ABS	-
51618301	4	Tampas do revestimento inferior	Al	0,99
51618401	4	Base das tampas de revestimento inf.	Al	0,79
36871553	2	Revestimento intermédio	Laminite	9,54
51297009	4	Revestimento superior	Laminite	3,35
-	4	Revestimento ABS	ABS	-
51588201	4	Pilares principais	Al	53,85
AG 6222-06	8	Cantos da janela	Al	1,18
	4	Parafusos dos cantos da janela	Aço	0,05
52674402	1	Painel exterior lateral E	Al	16,38
52674401	1	Painel exterior lateral D	Al	16,38
Pos 1 de 51588501	2	Canto de fixação base/lateral E	Aço	7,123
Pos 2 de 51588501	2	Canto de fixação base/lateral E 2	Aço	7,123
Pos 3 de 51588502	2	Canto de fixação base/lateral D	Aço	7,123
Pos 4 de 51588502	2	Canto de fixação base/lateral D 2	Aço	7,123
51333100 (51333111)	2	Perfil da base	Al	19,120
379421	4	Perfil 1 de aperto da base	Al	1,130
51593001	4	Perfil 2 de aperto da base	Al	0,906
51593002	4	Perfil 3 de aperto da base	Al	1,216

Avaliação do Ciclo de Vida de uma estrutura de autocarro fabricada por Enrolamento Filamentar e RTM

59103302	2	Janela abatível	Vidro	-
Pal Vental-Caixilho+Pega (51599602)	2	Caixilho da janela abatível	Al	-
Pal Vental Dobradiça (EL)	2	Dobradiça da janela abatível	Al	-
51599602	2	Janela principal	Vidro	-
59103703	2	Suporte inferior (cor-de-rosa)	Aço	0,270
51590810	1	Painel E (antes do revestimento)	Al	6,763
51590811	1	Painel D (antes do revestimento)	Al	6,763
AG 6221-05	4	Cantos pequenos (azul ciano)	Al	0,272
41355904	4	Cantoneiras (verde)	Aço	1,093
	4	Parafusos das cantoneiras	Aço	0,044
455119-Prfa	4	Parafuso M8x26 (52077701)	Aço	0,065
455119-Anilha	4	Anilha Rosc M8 (52977701)	Aço	0,007
356266	4	Casquilho	Al	0,026
51592701	4	Patelas (verde claro)	Aço	2,769
59103228	4	Espaçador para fixação do chão	Aço	3,799
TOTAL	398			402,299

Anexo A2: Lista de componentes do módulo FEUPBUS**Tabela A 2 – Lista de componentes do módulo FEUPBUS**

Código	Qt.	Designação	Material	Massa (kg)
-	1	Corpo central	Fibra de vidro e resina de poliéster	357,238
59103302	2	Janela abatível	Vidro	-
Pal Vental-Caixilho+Pega (51599602)	2	Caixilho da janela abatível	Al	-
Pal Vental Dobradiça (EL)	2	Dobradiça da janela abatível	Al	-
51599602	2	Janela principal	Vidro	-
51618101	2	Revestimento inferior	ABS	-
-	4	Revestimentos ABS	ABS	-
-	2	Insertos	Contraplacado	1,52
-	2	Chapa de aço 15 mm	Aço	0,374
TOTAL	19			359,132

ANEXO B: FICHAS TÉCNICAS

Anexo B1: Ficha técnica Al 6106-T6

Aluminium Alloy 6106 - T6 Extrusions



SPECIFICATIONS

Commercial	6106
EN	6106

Aluminium alloy 6106 is an extrusion alloy designed to provide optimum combination of mechanical properties, complexity of shape, minimum section thickness and good surface finish together with the good resistance, weldability and formability associated with the 6000 series alloys. Very complex shapes are possible which are not obtainable with stronger alloys such as 6182.

(6000 series alloys achieve their properties by thermal treatment which can be adjusted to provide combinations of strength and formability conditions with good corrosion resistance and weldability. Because the properties are obtained by thermal treatment, fusion welding reduces the non-welded properties by up to 50%.)

Applications
Alloy 6106 is typically used for:
~ Structural applications
~ Ladders, pylons and towers
~ Railway Rolling Stock
~ Marine applications
~ Automotive structures

CHEMICAL COMPOSITION

BS EN 572-2:2009 Alloy 6106	
Element	% Present
Magnesium (Mg)	0.40 - 0.80
Silicon (Si)	0.30 - 0.60
Iron (Fe)	0.0 - 0.35
Manganese (Mn)	0.05 - 0.20
Copper (Cu)	0.0 - 0.25
Chromium (Cr)	0.0 - 0.20
Others (Total)	0.0 - 0.15
Zinc (Zn)	0.0 - 0.10
Titanium (Ti)	0.0 - 0.10
Other (Each)	0.0 - 0.05
Aluminium (Al)	Balance

ALLOY DESIGNATIONS

TEMPER TYPES

The most common temper for 6106 aluminium is:
• T6 - Solution heat treated and artificially aged

SUPPLIED FORMS

• Extrusions

GENERIC PHYSICAL PROPERTIES

Property	Value
Density	2.70 g/cm ³
Melting Point	655 °C
Thermal Expansion	23.4 x10 ⁻⁶ /K
Modulus of Elasticity	69.5 GPa
Thermal Conductivity	192 W/m.K
Electrical Resistivity	0.035 x10 ⁻⁶ Ω .m

MECHANICAL PROPERTIES

BS EN 755-2:2008 Profiles only Up to 100mm Wall Thickness	
Property	Value
Proof Stress	200 Min MPa
Tensile Strength	250 Min MPa
Elongation A50 mm	6 Min %
Hardness Brinell	75 HB
Elongation A	8 Min %

Above readings refer to profiles in the T6 condition only.

WELDABILITY

Weldability - Gas: Good
Weldability - Arc: Very Good
Weldability - Resistance: Good
Brazability: Good
Solderability: Good

Anexo B2: Ficha técnica M87 High Temp Mold Release Wax®



Safety Data Sheet

Copyright, 2011, Meguiar's, Inc. All rights reserved. Copying and/or downloading of this information for the purpose of properly utilising Meguiar's, Inc. products is allowed provided that: (1) the information is copied in full with no changes unless prior written agreement is obtained from Meguiar's, Inc., and (2) neither the copy nor the original is resold or otherwise distributed with the intention of earning a profit thereon.

Document group:	28-5382-8	Version number:	1.01
Revision date:	05/09/2011	Supersedes date:	02/09/2011
Transportation version number:	1.00 (02/09/2011)		

This Safety Data Sheet has been prepared in accordance with the REACH Regulation (EC) 1907/2006 and its modifications.

SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking

1.1. Product identifier

M87, High Temp Mold Release Wax (Original Formula): M8711

1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses

Mold release agent

1.3. Details of the supplier of the substance or mixture

Address: Meguiars United Kingdom Limited, 3 Lamport Court, Heartlands, Daventry, Northants, NN11 8UF
Telephone: +44 (0)870 241 6696
E Mail: info@meguiars.co.uk
Website: www.meguiars.co.uk

1.4. Emergency telephone number

+44 (0)870 241 6696

SECTION 2: Hazard identification

2.1. Classification of the substance or mixture

Dangerous substances(67/548/EEC)/preparations(1999/45/EC) directive

2.2. Label elements

Dangerous substances(67/548/EEC)/preparations(1999/45/EC) directive

Symbols None.

Contains:

No ingredients are assigned to the label.

M87, High Temp Mold Release Wax (Original Formula): M8711**Risk phrases**

R66 Repeated exposure may cause skin dryness or cracking.
 R67 Vapours may cause drowsiness and dizziness.

Safety phrases

S23A Do not breathe vapour.
 S24 Avoid contact with skin.
 S62 If swallowed, do not induce vomiting: Seek medical advice immediately and show this container or label.

Notes on labelling

R65 is not required on the label due to the product's viscosity.

Nota P applied to CAS 64742-48-9.

N; R51/53 classification for CAS 64742-48-9 and 64742-47-8 not applied based on vendor data.

2.3. Other hazards

None known.

SECTION 3: Composition/information on ingredients

Ingredient	CAS Nbr	EU Inventory	% by Wt	Classification
Naphtha (petroleum), hydrotreated heavy	64742-48-9	EINECS 265-150-3	40 - 60	Xn:R65 - Nota 4,H,P (EU) N:R51/53 (Vendor) R66; R67 (Self Classified) Asp. Tox. 1, H304 - Nota H,P (CLP) STOT SE 3, H336 (Self Classified)
Distillates (petroleum), hydrotreated light	64742-47-8	EINECS 265-149-8	10 - 30	Xn:R65 - Nota 4,H (EU) R66; R67 (Self Classified) N:R51/53 (Concawe no. 01/54) Asp. Tox. 1, H304 (CLP) STOT SE 3, H336 (Self Classified)
Conditioners	Trade Secret		< 20	
Siloxanes and silicones, di-Me	63148-62-9		5 - 10	

Please see section 16 for the full text of any R phrases and H statements referred to in this section

Please refer to section 15 for the any applicable Notas that have been applied to the above components

For information on ingredient occupational exposure limits or PBT or vPvB status, see sections 8 and 12 of this SDS

SECTION 4: First aid measures**4.1. Description of first aid measures****Eye contact**

Flush with large amounts of water. Remove contact lenses if easy to do. Continue rinsing. If signs/symptoms persist, get medical attention.

Skin contact

Anexo B3: Ficha técnica Econostitch®



ZI Haneboesch
L-4562 Differdange
LUXEMBOURG

Phone : +352 58 22 82 1
Fax : +352 58 49 35

E-mail : sales@airtech.lu
Website : www.airtech.lu

DATA SHEET

Econostitch®

Non-coated nylon peel ply with red tracers

■ DESCRIPTION

Econostitch® is a nylon peel ply with red tracers which make this peel ply more visible before and after a cure, reducing the possibility of the peel ply being left on the part.

Our Econo peel plies are designed to work in resin infusion or hand lay-up processes. Econostitch® assists or eliminates the need for sanding or abrading on your composite laminate.

■ TECHNICAL DATA

Maximum use temperature	190 °C
Fibre type	Nylon
Weight	88 g/m ²
Thickness	0,006 inch (0,152 mm)
Colour	White
Tracer	Red

■ SIZES

Width	Length	Packaging
60 inches (152,4 cm)	300 yards (274,3 m)	1 master roll

■ NOTES

- > Maximum use temperature is dependant upon the duration at maximum temperature and is process specific. Airtech recommends testing prior to use.
- > Hot knife slitting upon request with 1 master roll as minimum order quantity.

Anexo B4: Ficha técnica MEKP Liquid Hardener®



MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Axson Technologies US, Inc.
1611 Hults Drive,
Eaton Rapids, MI 48827 - U.S.A.
Tel. (517) 663-8191

Emergency Phone (ChemTrec): 1-800-424-9300

4/11/2012

1- COMMERCIAL NAME : MEKP Liquid Hardener

Do not handle this material until the manufacturer's safety precautions have been read and understood! Regulations require that all employees be educated & trained on the Material Safety Data Sheets for all products with which they come in contact.

2- COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS :

CHEMICAL NAME	C.A.S	QTY%
1. Hydrogen Peroxide	7722-84-1	<1
2. Methyl Ethyl Ketone Peroxide	1338-23-4	30-40
3. Dimethyl Phthalate	131-11-3	40-50
4. Dialkyl Phthalate	68515-42-4	10-20
5. Methyl Ethyl Ketone	78-93-3	1-2

3- HAZARDS IDENTIFICATION :

Health Hazard : Strong irritant and corrosive to the eyes. Can irritate nose, throat, and/or lungs.

4- FIRST AID MEASURES :

- **Change any soiled clothing immediately.**
- **In case of eye contact :** open eyelids as far as possible and flush with large quantities of water for at least twenty minutes. Seek immediate medical attention.
- **In case of skin contact :** physically remove the product and wash skin thoroughly with soap and water. Consult a physician if skin irritation occurs.
- **In case of swallowing :** do not induce vomiting; seek immediate medical attention.
- **In case of inhalation :** remove the patient from the contaminated area. Consult physician if after-effects occur.

5- FIRE-FIGHTING MEASURES :

5-1 Fire-extinguisher types :

Use : chemical foam, CO₂, powder. Where the fire is of major proportions, water spray may also be used.

5-2 Specific fire and explosion risks :

Heat or contamination may cause hazardous decomposition. MEK is toxic under combustion and may produce flammable vapors.

5-3 specific protective measures during firefighting :

Firefighting personnel should be equipped with insulated, autonomous respiratory protection equipment.

6- ACCIDENTAL RELEASE MEASURES :

6-1 Individual protection :

Ventilation : General ventilation is required during normal use. Remove all sources of ignition.

Respiratory protection : If PEL or TLV listed in this data sheet is exceeded, then suitable respiratory protection must be worn to prevent over-exposure (NIOSH Approved).

Protective gloves : Wear appropriate impervious gloves to prevent skin contact.

Eye protection : Wear protective safety glasses with side-shields or face shield.

Other protection : Wear appropriate clothing to prevent skin contact.

6-2 Environmental protection : Please see § 12

6-3 Decontamination procedures :

- Remove all sources of ignition and ventilate area.
- Contain spill material in order to avoid its transfer to sewers or rivers and streams.
- Physically remove the material.
- Cover product with sand, earth, or any other similar absorbent substance in order to soak up material. The resulting mix may then be shoveled into containers and removed for proper disposal (see § 13).

7- HANDLING AND STORAGE :

7-1 Handling :

- Inform personnel of risks associated with the product, the precautions to be taken and procedures to follow where an accident occurs. General ventilation is required during normal use. Remove all sources of ignition.
- Observe personal hygiene rules to avoid contact with eyes and skin.
- Avoid inhaling vapors produced by the material, especially when heated and/or sprayed.
- Install showers and eye baths ("fountain" type).
- Ensure sufficient ventilation, including appropriate local air extraction, in order to comply with workplace exposure limits. Where vapors could escape into the air, local specific means of ventilation will be necessary.
- Wash hands thoroughly at beginning of every work break and at the end of the working day.
- Work stations and the general working area must be kept perfectly clean.
- Avoid exposure to the material of persons having suffered from eczema or any other skin condition.

7-2 Storage :

- Keep the material hermetically sealed in its original packaging, protected from humidity and at a temperature between 59 and 77°F / 15 and 25°C in a well-ventilated storage facility.
- Ensure that the floor of the storage area is impermeable and concave to provide effective containment.
- Keep the product away from food.
- Reproduce labeling on all new packs where original packaging is divided.

ANEXO C: ÁRVORES CORRESPONDENTES AO CICLO DE VIDA DE CADA MÓDULO

Anexo C1: COBUS

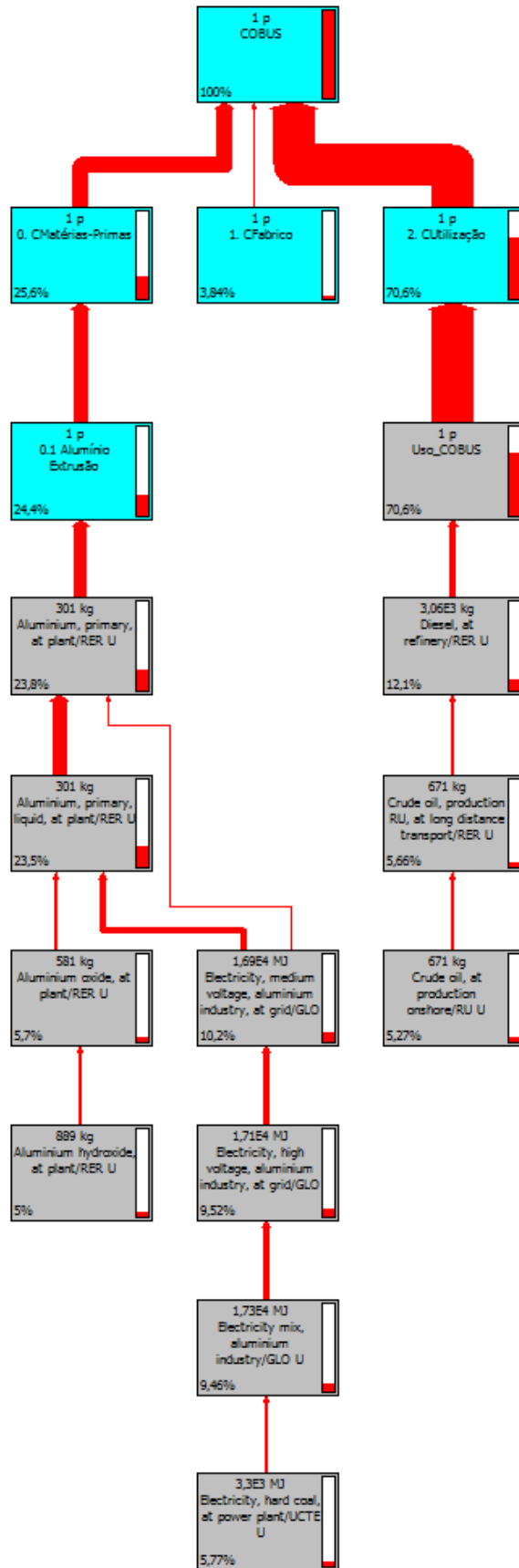


Figura C 1 – Árvore correspondente ao ciclo de vida do módulo COBUS

Anexo C2: FEUPBUS

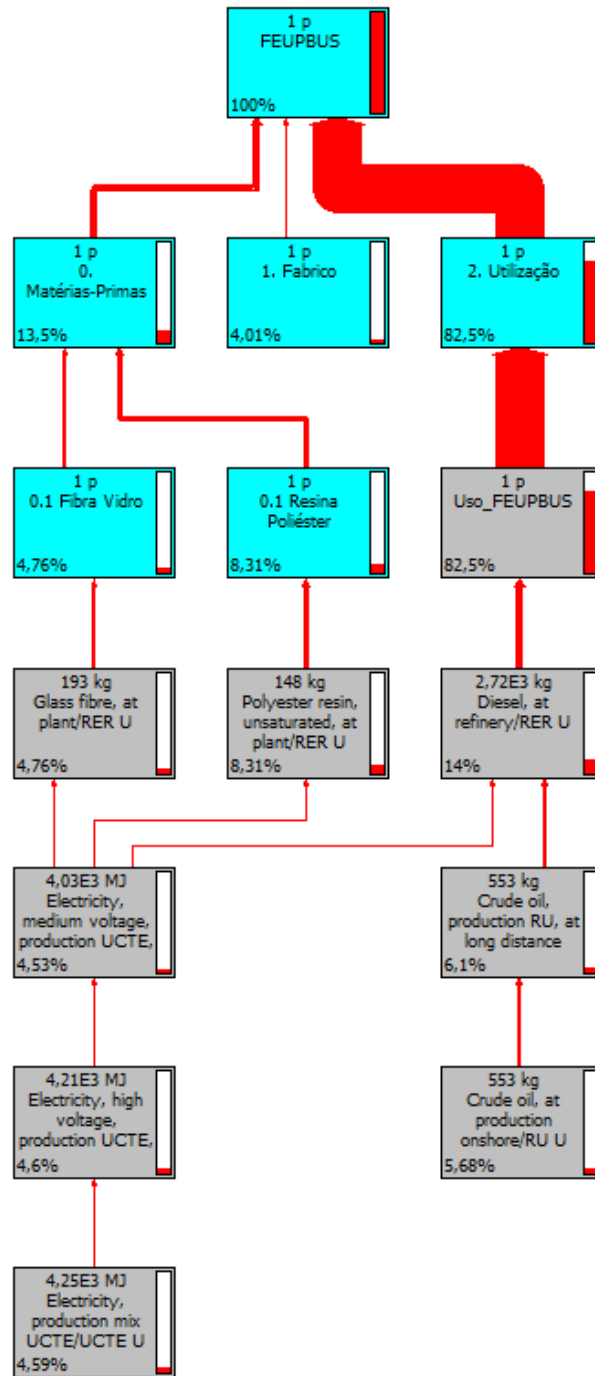


Figura C 2 - Árvore correspondente ao ciclo de vida do módulo FEUPBUS

ANEXO D: FATORES DE CONVERSÃO PARA A AGREGAÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL *MIDPOINT* EM INDICADORES *ENDPOINT*

Tabela D 1 – Fatores de conversão para a agregação das categorias de impacto ambiental *midpoint* em indicadores *endpoint* (Goedkoop et al. 2013)

	Categorias de impacto ambiental finais			
	Unidade	Saúde Humana (DALY)	Ecossistemas (espécies x ano)	Recursos (\$)
Alteração Climática	kg (CO ₂ para o ar)	1,40 x 10 ⁻⁶	8,73 x 10 ⁻⁶	0
Depleção Camada Ozono	kg (CFC-11 para o ar)	Ver tabela abaixo	0	0
Toxicidade Humana	kg (14DCB para o ar urbano)	7,0 x 10 ⁻⁷	0	0
Formação de Oxidantes Fotoquímicos	kg (NMVOC para o ar urbano)	3,9x10 ⁻⁸	0	0
Formação de Partículas	kg (PM ₁₀ para o ar)	2,6x10 ⁻⁴	0	0
Radiação Ionizante	kg (U235 para o ar)	1,64x10 ⁻⁸	0	0
Acidificação Terrestre	kg (SO ₂ para o ar)	0	5,8x10 ⁻⁹	0
Eutrofização Água Doce	kg (P para água doce)	0	4,44x10 ⁻⁸	0
Ecotoxicidade Terrestre	kg (1,4-DCB para o solo)	0	1,51x10 ⁻⁷	0
Ecotoxicidade Água Doce	kg (1,4-DCB para a água doce)	0	8,61x10 ⁻¹⁰	0
Ecotoxicidade Água Salgada	kg (1,4-DCB para a água salgada)	0	1,76x10 ⁻¹⁰	0
Ocupação Terras Agrícolas	m ² x ano (solo agrícola)	0	-	0
Ocupação Solo Urbano	m ² x ano (solo urbano)	0	-	0
Transformação de Terrenos Naturais	m ² (solo natural)	0	-	0
Depleção de Recursos	kg (Fe)	0	0	0,0715

Depleção de Combustíveis Fósseis	kg (petróleo)	0	0	0,165
---	---------------	---	---	-------

Para a categoria Depleção da Camada de Ozono, não foi calculado um único fator de conversão, sendo apresentado um fator distinto consoante as substâncias.

Tabela D 2 - Fatores de conversão para a agregação da categoria de impacto ambiental Depleção da Camada de Ozono em indicadores *endpoint* (Goedkoop et al. 2013)

Substâncias contribuidoras para a Depleção da Camada de Ozono	Visão Hierárquica
CFCs	$1,75 \times 10^{-3}$
CCL ₄	$3,30 \times 10^{-3}$
CH ₃ CCI ₃	$4,41 \times 10^{-3}$
Halogéneos	$2,64 \times 10^{-3}$
HCFCs	$3,65 \times 10^{-3}$
CH ₃ Br	$4,72 \times 10^{-3}$

ANEXO E: RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA O FEUPBUS VERSÃO 2

Anexo E1: Aceleração vertical de 3g (sem reforço)

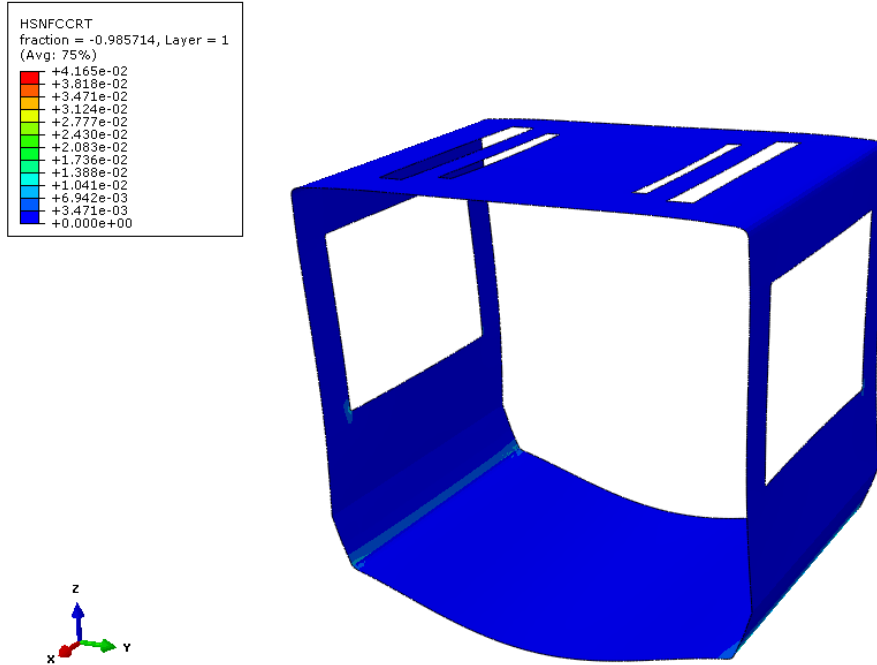


Figura E 1 - Propagação do dano das fibras à compressão (HSNFCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

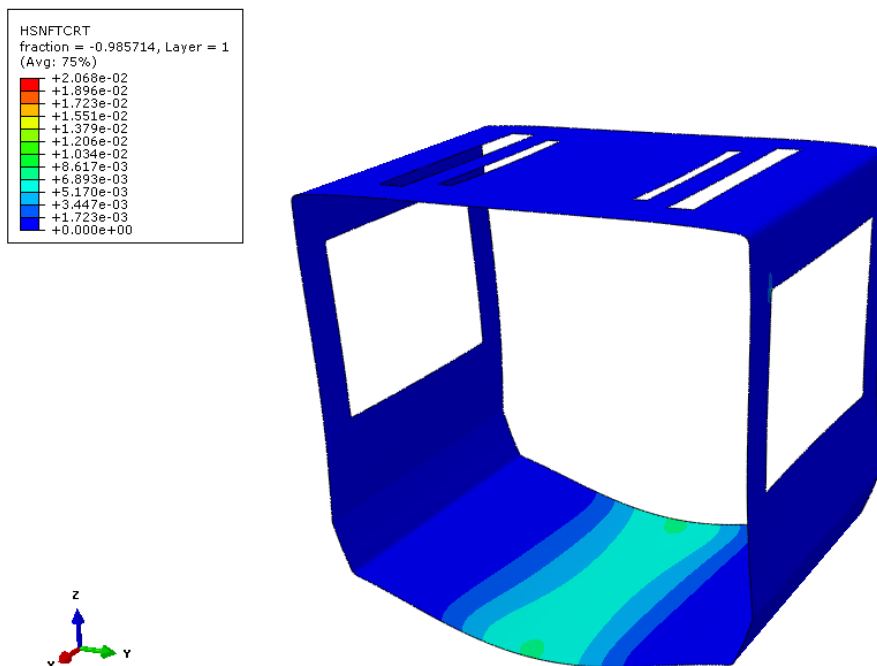


Figura E 2 - Propagação do dano das fibras à tração (HSNFTRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

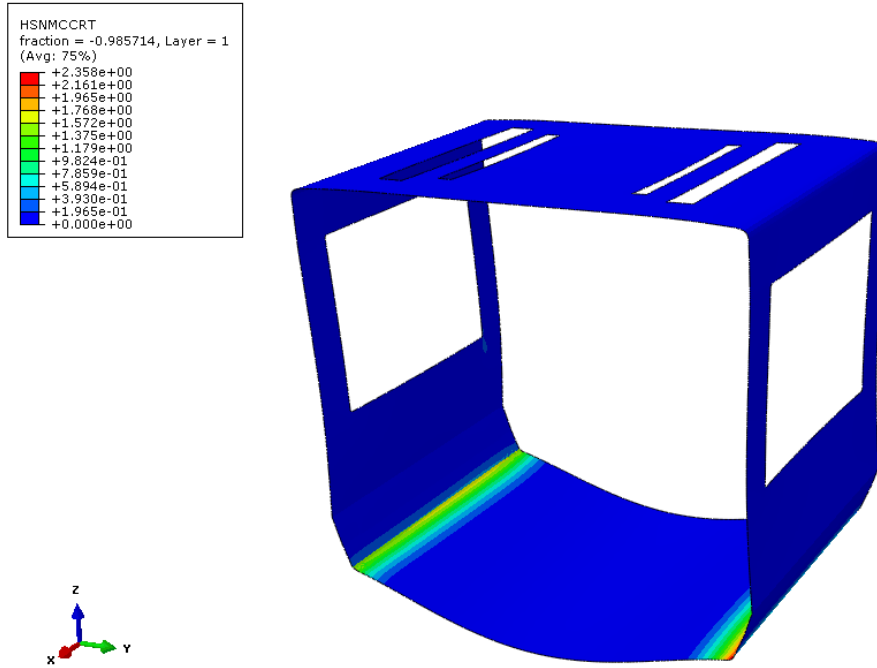


Figura E 3 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

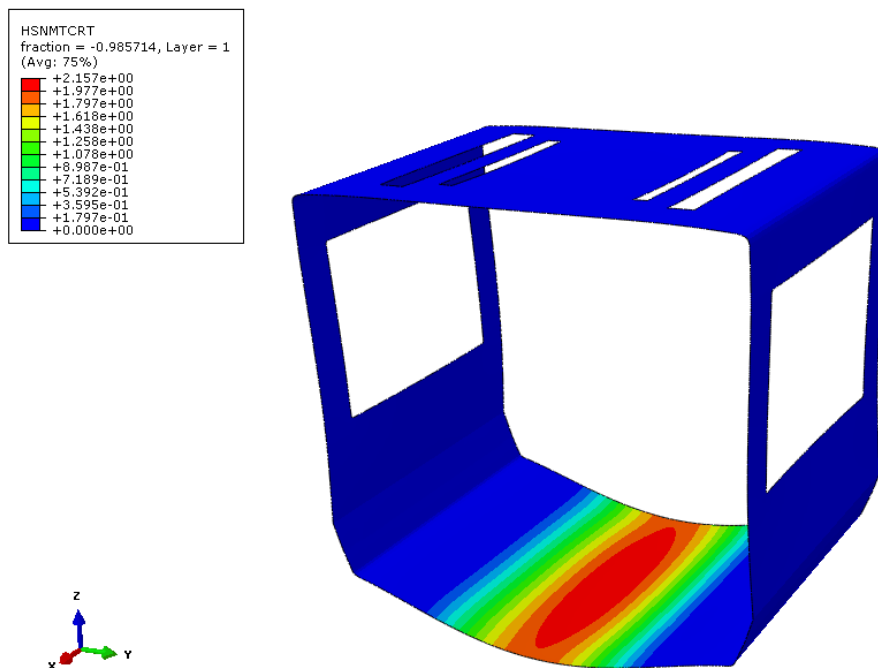


Figura E 4 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2, quando sujeito a uma aceleração vertical de 3g

Anexo E2: Aceleração longitudinal de 0,75g (Com reforço)

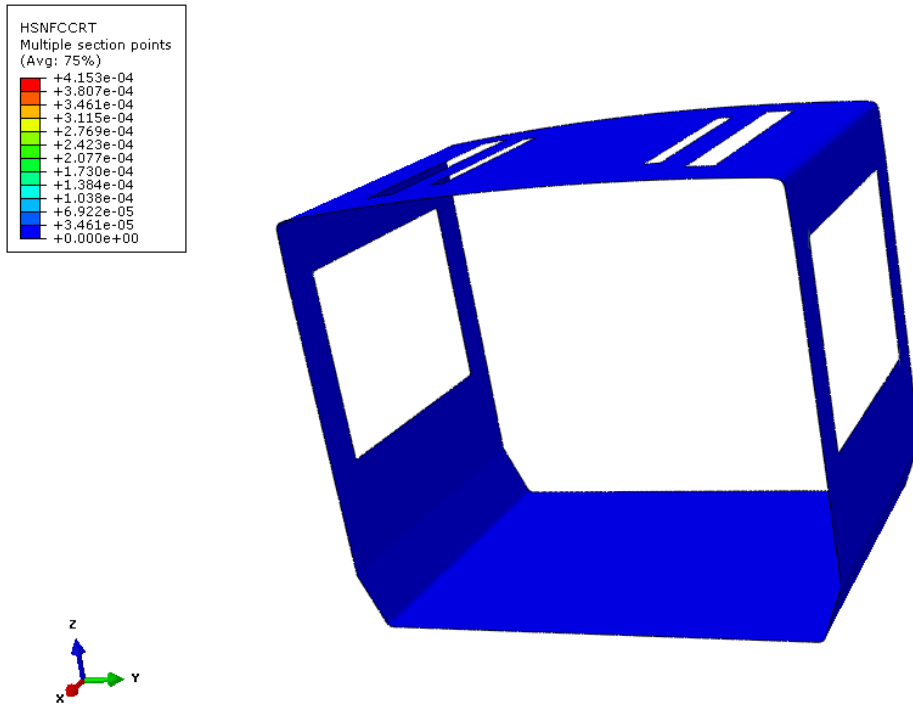


Figura E 5 - Propagação do dano das fibras à compressão (HSNFCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g

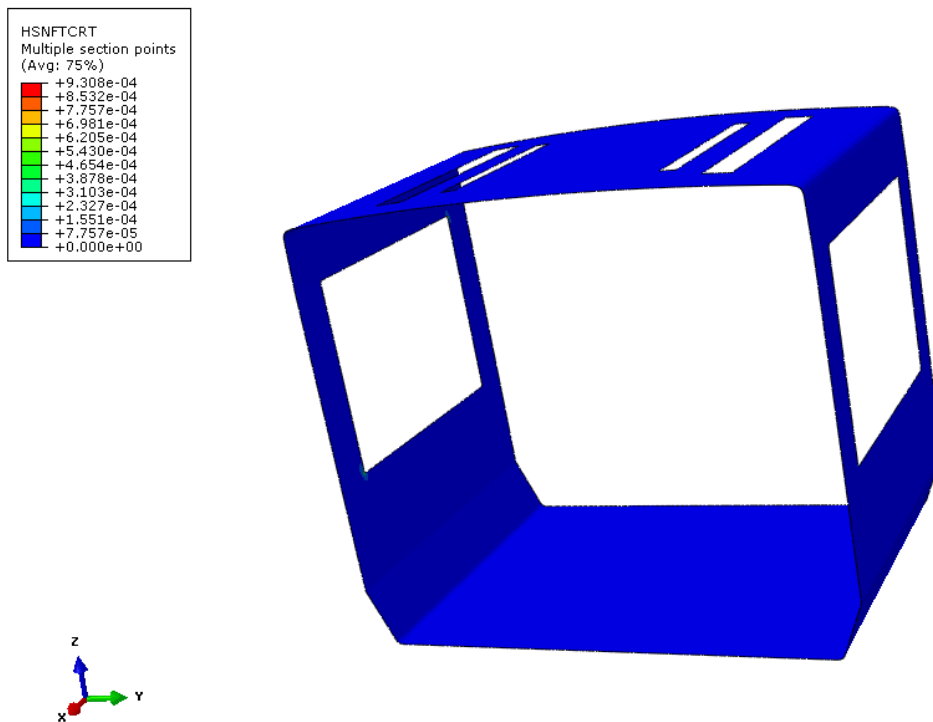


Figura E 6 - Propagação do dano das fibras à tração (HSNFTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g

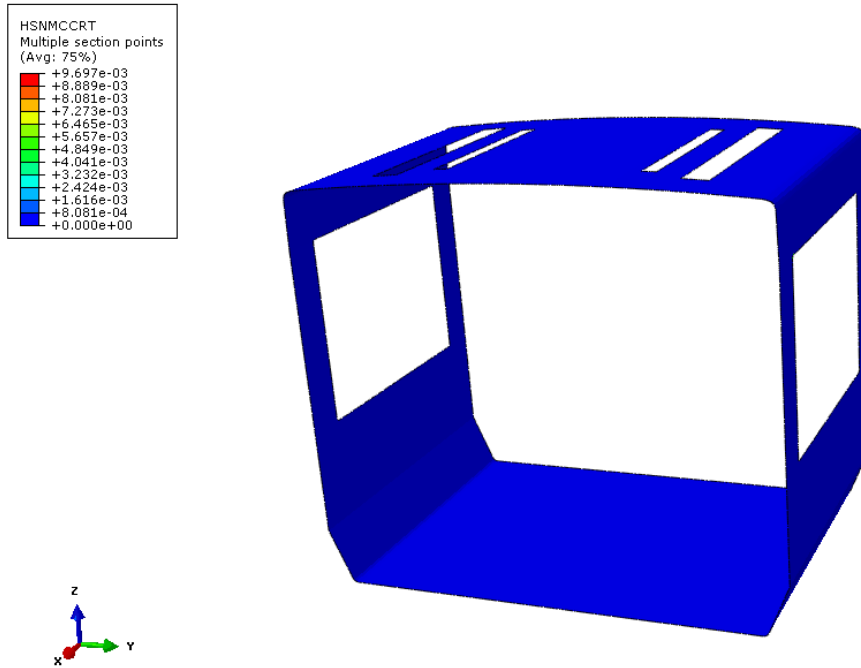


Figura E 7 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g

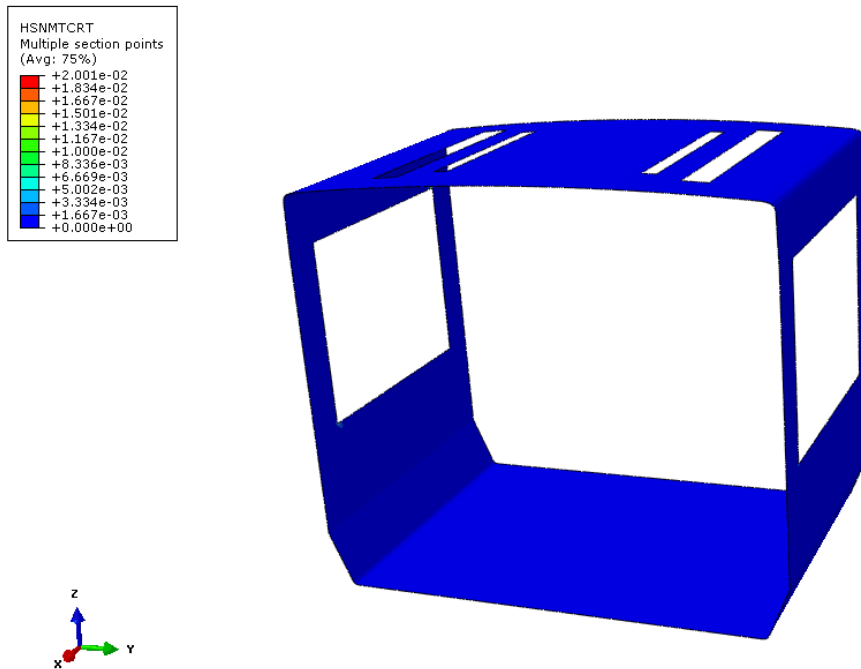


Figura E 8 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração longitudinal de 0,75g

Anexo E3: Aceleração lateral de 1,25g (Com reforço)

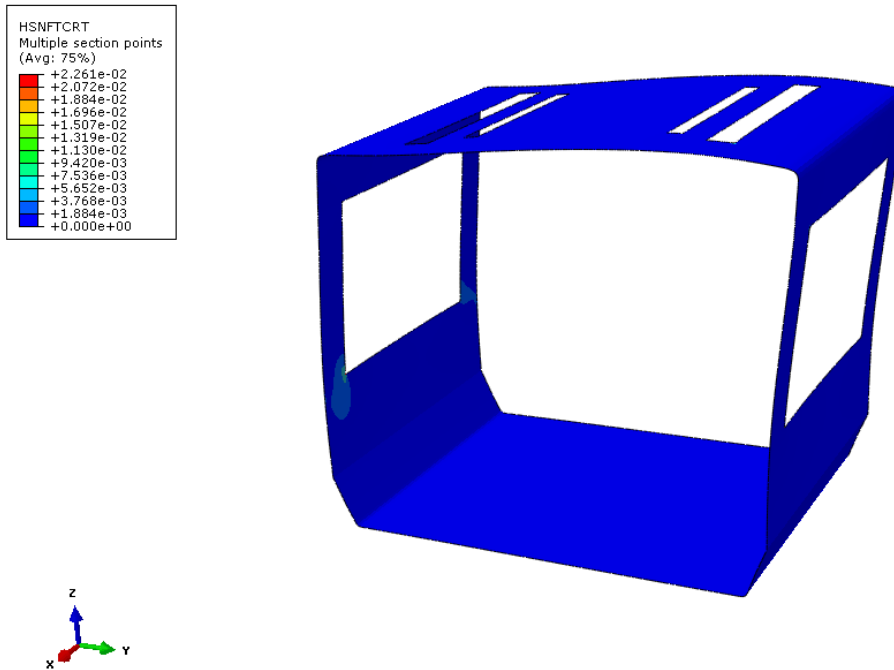


Figura E 9 - Propagação do dano nas fibras à tração (HSNFTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g

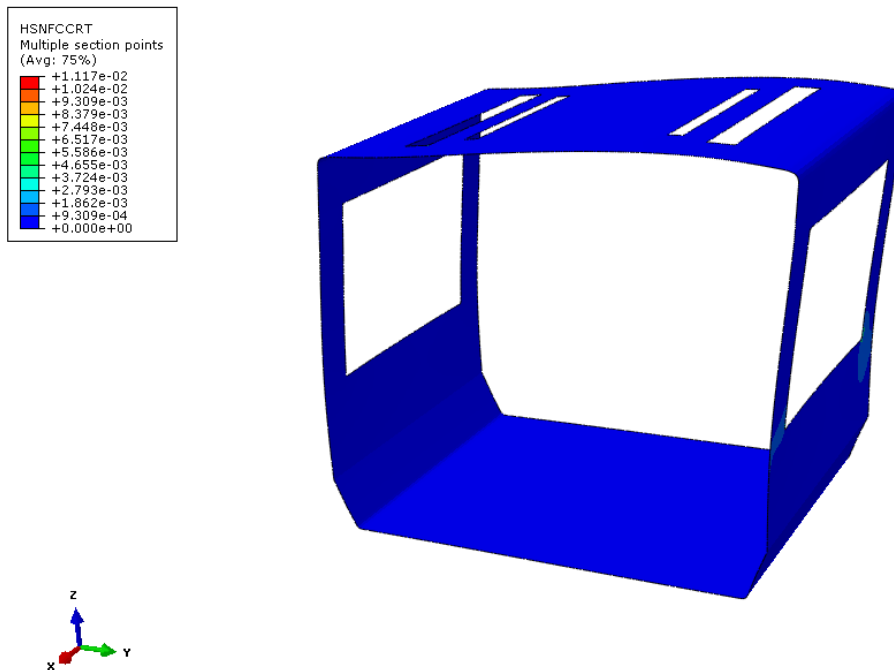


Figura E 10 - Propagação do dano nas fibras à compressão (HSNFCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g

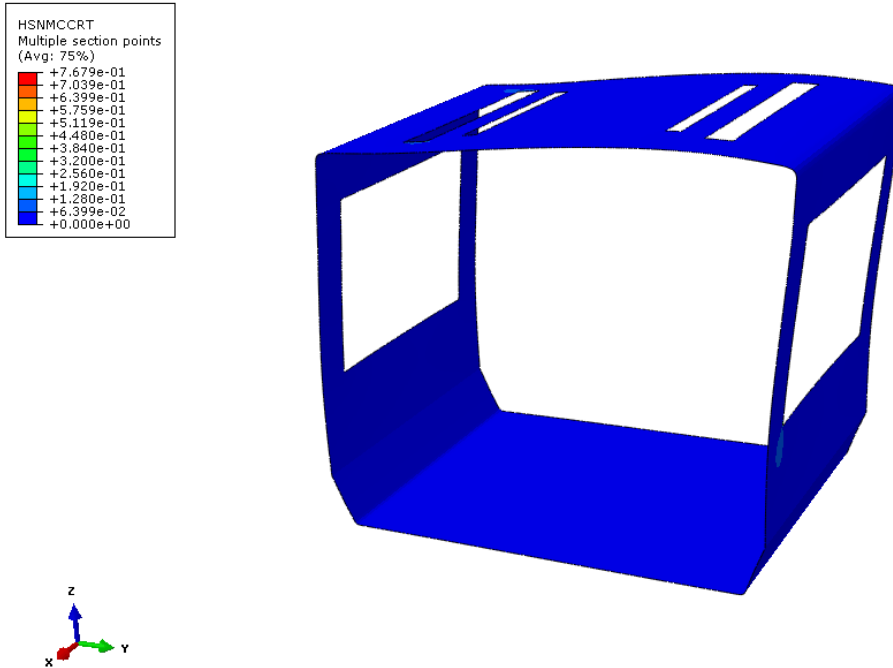


Figura E 11 - Propagação do dano na matriz à compressão (HSNMCCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g

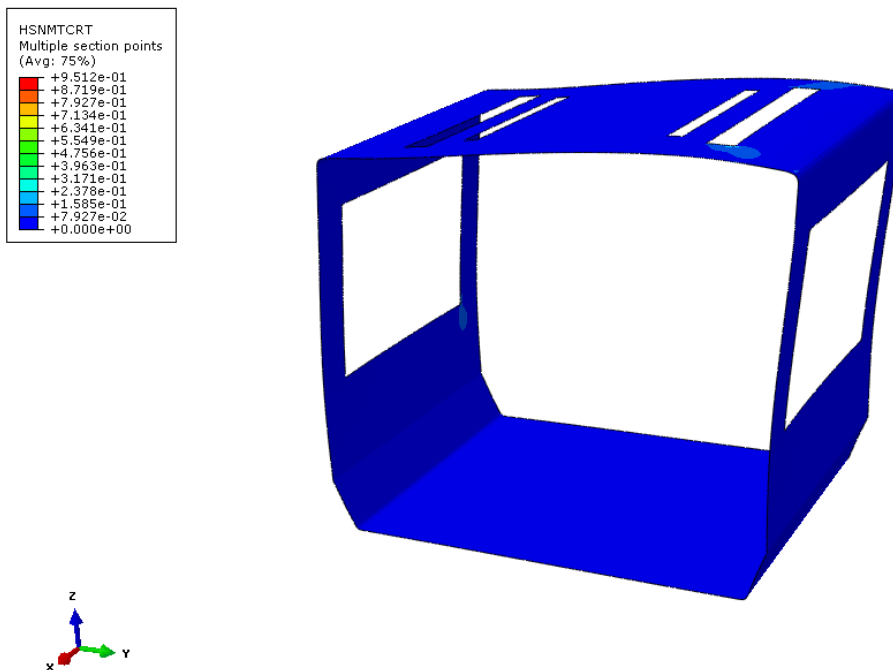


Figura E 12 - Propagação do dano na matriz à tração (HSNMTCRT) para o módulo FEUPBUS versão 2 com reforço, quando sujeito a uma aceleração lateral de 1,25g