



TÉCNICO
LISBOA

Caracterização e Otimização da Cadeia de Abastecimento Aeronáutica

O caso da Embraer

Dinis Henriques Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão industrial

Orientadoras: Prof.^a Ana Paula Ferreira Dias Barbosa Póvoa

Prof.^a Tânia Rute Xavier de Matos Pinto Varela

Júri

Presidente: Prof.^a Susana Isabel Carvalho Relvas

Orientadora: Prof.^a Ana Paula Ferreira Dias Barbosa Póvoa

Vogal: Prof.^a Inês Marques Proença

Outubro 2017

Resumo

As especificidades da indústria aeronáutica enquanto setor de elevada tecnologia, bem como a forte rivalidade verificada entre empresas, os elevados custos e períodos de desenvolvimento, e os riscos inerentes aos projetos têm aumentado a complexidade das cadeias de abastecimento das empresas produtoras de aviões. Com o aumento da globalização, os principais fabricantes revelam cada vez mais consciência do impacto que o desempenho das suas cadeias de abastecimento assume na obtenção de vantagens competitivas no setor. Neste sentido, este trabalho apresenta a caracterização das cadeias de abastecimento aeronáuticas baseada na revisão do estado da arte, onde é analisada a sua evolução, definidos os modelos de cadeias de abastecimento do presente e identificados os principais desafios atuais, através de uma visão holística da colaboração entre entidades, da sustentabilidade e da resiliência. Verifica-se que o fabrico de produtos de qualidade a um custo razoável deixou de ser uma estratégia suficiente para o aumento da competitividade dos principais fabricantes de aviões, pelo que surgem novas preocupações que incluem iniciativas de desenvolvimento, produção e distribuição sustentáveis. Neste contexto, destaca-se a inovação associada à introdução de novos materiais compósitos e respetivos processos de produção na cadeia de abastecimento aeronáutica. A produção em autoclave, apresentada como a tecnologia padrão para a obtenção de materiais compósitos de elevado desempenho, assume elevados custos aparentes de aquisição e operação, e tem estimulado o interesse recente dos OEMs em novos materiais e tecnologias fora de autoclave. No presente trabalho são sistematizadas as principais informações e comparadas as principais diferenças económicas e ambientais associadas à sua introdução na cadeia de abastecimento aeronáutica, de forma a alavancar o desenvolvimento de modelos analíticos de projeto e planeamento, enquanto ferramentas de apoio à tomada de decisão.

Palavras-Chave: cadeia de abastecimento aeronáutica; desenvolvimento de novos produtos; processos e materiais compósitos; projeto e planeamento de rede; sustentabilidade.

Abstract

Airplane manufacturers' supply chains have increased its complexity over the past decades. The tremendous technological changes, the high R&D costs, as well as the inherent risks of the projects are some of the factors that contribute to this enlarged complexity. In an increasingly globalized landscape, the main industry players become more aware of the supply chain impacts in their competitive position. This document presents the aerospace supply chain based on the state of the art: its evolution, the existing models and the current industry challenges are some of the topics presented through a cooperation, sustainability and resilience perspective. It is concluded that product manufacturing at a reasonable cost is no longer a viable strategy for airplane manufacturers to increase competitiveness. Therefore, new challenges such as sustainable development, production and distribution arise. In this context, the introduction of new composite materials and new manufacturing process have been disrupting the existing supply chain. The autoclave production – presented as the standard technology to the production of high performance composite materials – carries excessive costs associated to the acquisition and operation. Therefore, OEMs have been exploring new materials and technologies out-of-autoclave (OOA). The present document provides a holistic approach of the economic and environmental differences associated to the OOA implementation. The ultimate goal is to use this information to foster the development of project and planning analytical models as decision support tools.

Keywords: aerospace supply chain; new product development; composites material and processes; design and network planning; sustainability.

Agradecimentos

Depois de uma longa caminhada na realização da presente dissertação, não poderia de forma alguma, prosseguir sem aproveitar a oportunidade para agradecer a todos aqueles que de algum modo contribuíram para a sua concretização.

À minha orientadora, a Professora Ana Póvoa, pelo seu apoio incondicional e permanente dedicação. Durante este percurso, nem sempre fácil, consegui com que nunca me sentisse sozinho com as suas palavras de compreensão, motivação e orientação. Obrigado não só por toda ajuda na dissertação, mas também pela sinceridade, confiança e por todos os ensinamentos que levarei comigo no futuro.

À minha co-orientadora, a Professora Tânia Varela, por quem tenho igualmente grande admiração. Por toda a paciência e enorme disponibilidade. Pela boa disposição e compreensão e por todos os conselhos e conhecimentos transmitidos.

Ao Carlos Malarranha, pelos ensinamentos, pelo estímulo de querer aprender mais e pelo enorme conhecimento da indústria aeronáutica que me permitiram caminhar em direção ao resultado final.

Ao Pedro Neto, por toda a paciência e enorme disponibilidade, por me ter ajudado a definir muitos dos pressupostos da dissertação, alertando-me para toda a complexidade do mundo dos materiais compósitos.

À Bruna Mota, por ter estado sempre disponível para me ajudar e discutir acerca de questões de sustentabilidade.

A todos os colegas, com quem privei durante a minha formação. Em especial aos que se tornaram meus amigos, que conviveram comigo nos melhores anos da minha vida e que me acompanham sempre tolerantes e bem-dispostos.

Aos meus pais pelo apoio incondicional, pela educação que me deram e por todos os sacrifícios que fizeram ao longo dos anos para que eu me pudesse dedicar aos estudos sem preocupações.

Aos meus irmãos, pela partilha de tantos e tantos momentos de alegria e amizade que ajudaram a tornar tudo mais fácil.

Por último à Mariana, a minha companheira de todos os momentos, bons e maus, que sempre me apoiou em todas as minhas decisões, e que acredita em mim incondicionalmente e me faz seguir em frente sempre confiante e sem receios.

Índice

Resumo	ii
Abstract	iii
Agradecimentos	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Acrónimos	ix
1. Introdução	1
1.1. Contextualização do Problema.....	1
1.2. Objetivos da Dissertação	2
1.3. Metodologia Adotada.....	2
1.4. Estrutura da Dissertação	3
2. Caracterização da Cadeia de Abastecimento Aeronáutica	4
2.1. Indústria Aeronáutica	4
2.1.1. Visão Geral da Indústria.....	4
2.1.2. Análise dos Segmentos de Mercado e Perspetivas Futuras da Indústria	5
2.2. A Evolução das Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas	7
2.3. As Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas Atuais	11
2.4. Os Desafios das Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas.....	14
2.4.1. A Colaboração nas Cadeias de Abastecimento Aeronáutica	15
Competências Core do OEM	16
O Papel dos Fornecedores na Cadeia de Abastecimento Aeronáutica	17
Alianças Estratégicas: o Poder das Parcerias de Risco	18
A Globalização da Cadeia de Abastecimento Aeronáutica	19
2.4.2. A Resiliência nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas.....	20
Práticas de Resiliência nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas.....	21
2.4.3. A Sustentabilidade nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas.....	22
Os Drivers da Sustentabilidade nas Cadeias Aeronáuticas	23
Os Desafios da Sustentabilidade nas Cadeias Aeronáuticas	24
2.5. O Desenvolvimento de novos materiais compósitos na Indústria Aeronáutica	25
2.6. Conclusões do Capítulo	26

3. Estudo de Caso: A Embraer	28
3.1. A Embraer S.A.....	28
3.2. História da Embraer.....	28
3.3. A Embraer no mundo	29
3.4. Cadeia de Abastecimento da Embraer	30
3.5. Caracterização do Problema.....	32
3.6. Conclusões do Capítulo	34
4. A Otimização do Projeto e Planeamento de Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas.....	35
4.1. Projeto e Planeamento de Cadeias de Abastecimento	35
4.2. Modelação de Projeto e Planeamento de Cadeias de Abastecimento	36
4.3. Conclusões do Capítulo	38
5. Caracterização de Cenários de Introdução de Novos Materiais Compósitos.....	39
5.1. Conceitos Fundamentais	39
5.2. Definição de Cenários em Estudo.....	43
5.2.1. Cenário A: Processo em Autoclave	44
5.2.2. Cenário B: Processo de Infusão de Resina Assistido por Vácuo (VARI)	45
5.2.3. Cenário C: Processo de Vacuum Bag Only (VBO).....	47
5.2.4. Cenário D: Processo de Termotransformação - Prensagem a Quente.....	48
5.3. Recolha e Análise de Dados.....	49
5.3.1. Estrutura da Cadeia de Abastecimento	49
5.3.2. Fornecedores e Matérias-Primas.....	51
5.3.3. Produto e dos Processos de Fabrico	52
5.3.4. Caracterização do Transporte.....	57
5.3.5. Caracterização Ambiental	59
6. Resultados e Discussão dos Cenários em Estudo.....	63
6.1. Resultados	63
6.1.1. Avaliação Económica	63
6.1.2. Avaliação Ambiental	65
6.2. Discussão e Recomendações	68
7. Conclusões Finais e Trabalho Futuro.....	72
Bibliografia	75

Anexos.....	89
Anexo A: Determinação das quantidades de matérias primas para produção unitária	89
Anexo B: Recomendações do fornecedor - etapa de cura em autoclave (Cenário A)	90
Anexo C: Recomendações do fornecedor – etapas de mistura e injeção (Cenário B).....	91
Anexo D: Recomendações do fornecedor - etapa de cura em forno (Cenário C).....	92
Anexo E: Recomendações do fornecedor - etapa de consolidação em prensa (Cenário D).....	93
Anexo F: Consumo energético das tecnologias vácuo, autoclave, forno e prensa	94
Anexo G: Impacto ambiental associado à atividade de transporte por caminhão refrigerado	95
Anexo H: Impacto ambiental associado à atividade de transporte por caminhão	96
Anexo I: Impacto ambiental associado à atividade de transporte por navio.....	97
Anexo J: Impacto ambiental associado à atividade de transporte da cadeia de abastecimento	98
Anexo K: Custeio das principais atividades de processamento dos cenários considerados.....	99

Lista de Figuras

Figura 1 - Etapas da metodologia adotada na elaboração da dissertação de mestrado	2
Figura 2 - Ciclo de vida de um novo programa-avião (ACARE, 2010).....	5
Figura 3 - Entregas mundiais de aeronaves, em valor, de 1989 a 2016 (Teal Group, 2017).....	5
Figura 4 - Número de aviões entregues de 1997 a 2015, por produtor (adaptado de Statista, 2016)....	6
Figura 5 - Evolução dos modelos de produção e fabrico (adaptado de Petrick, 2007).....	8
Figura 6-A - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: Era dos "Titans da Indústria (adaptado de Oliveira, 2005).....	9
Figura 6-B - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: Elevada integração vertical (adaptado de Oliveira, 2005).....	9
Figura 6-C - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: "OEM lead supply chain" (adaptado de Oliveira, 2005).....	10
Figura 6-D - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: Tendência do modelo integrador de sistemas (LSSI) (adaptado de Oliveira, 2005).....	10
Figura 7 - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica (adaptado de Beelaerts et al., 2010)	11
Figura 8 - Montagem final de um avião: processo de montagem total (Beelaerts et al., 2010)	13
Figura 9 - Montagem final de um avião: processo de integração de sistemas principais (Beelaerts et al., 2010).....	13

Figura 10 – Drivers da Sustentabilidade nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas (adaptado Gopalakrishnan et al., 2012).	23
Figura 11 - Principais desafios da Cadeia de Abastecimento Aeronáutica	27
Figura 12 - Presença global da Embraer (adaptado de Embraer, 2015)	29
Figura 13 - Cenário competitivo atual da Embraer – Segmento de 70 a 130 assentos (adaptado de Embraer, 2015).....	31
Figura 14 - Principais sistemas de um avião Embraer e exemplos de parceiros associados ao modelo E190-E2.....	32
Figura 15 - Constituição de um material compósito (adaptado de Strong, 2008).....	39
Figura 16 - Ciclo típico de produção de um compósito termoendurecível (adaptado de Bourban et al., 2000).....	41
Figura 17 - Ciclo típico de produção de um compósito termoplástico (adaptado de Bourban et al., 2000)	42
Figura 18 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoendurecíveis em autoclave	44
Figura 19 - Representação esquemática dos processos VARI (esquerda) e RTM (direita) (adaptado de NetComposites, 2017).....	45
Figura 20 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoendurecíveis através da infusão de resina	46
Figura 21 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoendurecíveis através de VBO.....	47
Figura 22 - Representação esquemática do processo VBO.....	48
Figura 23 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoplásticos por prensagem a quente	48
Figura 24 - Representação genérica da rede considerada	50
Figura 25 - Estrutura e respetivos fluxos da Cadeia de Abastecimento.....	50
Figura 26 - Dimensões do demonstrador.....	53
Figura 27 - Fases de processamento de um material compósito.....	54
Figura 28 - Custo Global Estimado para os Cenários em Estudo	64
Figura 29 - Custo das principais fases associadas à produção de compósitos nos cenários em estudo.....	65
Figura 30 - Impacto Ambiental Global Estimado para os Cenários em Estudo.....	66

Figura 31 - Impacto ambiental das principais fases associadas à produção de compósitos nos cenários em estudo.....	67
Figura 32 - Diagrama radar com resultados dos cenários normalizados	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais objetivos estratégicos das cadeias de abastecimento aeronáuticas (adaptado de Exostar, 2007; Boeing, 2016; Airbus, 2016)	15
Tabela 2 - Papel dos fornecedores na cadeia de abastecimento aeronáutica (adaptado de Laseter e Ramdas, 2002).....	17
Tabela 3 - Cenários em Estudo	44
Tabela 4 - Caracterização das matérias-primas	52
Tabela 5 - Lista de quantidades de matérias-primas necessárias	53
Tabela 6 - Duração das principais atividades envolvidas na preparação da produção.....	55
Tabela 7 - Duração das principais atividades envolvidas na produção e consolidação	56
Tabela 8 - Custos operacionais.....	57
Tabela 9 - Distância entre entidades e respetivo tempo de transporte	58
Tabela 10 - Consumo energético da etapa de produção do prepreg vs infusão	61
Tabela 11 - Caracterização ambiental dos cenários em estudo.....	62
Tabela 12 - Resultados globais de cada um dos cenários em estudo	68

Acrónimos

BOLP – *Bi-Objective Linear Programming*

FAMA – *Fábrica Argentina Militar de Aviones*

I&D – *Investigação e Desenvolvimento*

IAMAT – *Introduction of Advanced Materials Technologies Into New Product Development for the Mobility Industries*

LCA – *Life-Cycle Assessment*

LCI – *Life Cycle Inventory*

LSSI – *Large Scale System Integrator*

MILP – *Mixed Integer Linear Programming*

MIT – *Massachusetts Institute of Technology*

MOMILP – *Multi-Objective Integer Linear Programming*

NPD – *New Product Development*

NPV – *Net Present Value*

OEM – *Original Equipment Manufacturer*

OOA – *Out-of-Autoclave*

PEEK – *Poly-ether-ether-ketone*

PEI – *Poli-éter-imida*

PIB – *Produto Interno Bruto*

PSU – *Polisulfona*

RTM – *Resin Transfer Molding*

SCND – *Supply Chain Network Design*

TBL – *Triple Bottom Line*

TBLOM – *Triple Bottom Line Optimization Modelling*

VARI – *Vacuum Assisted Resin Infusion*

VBO – *Vacuum Bag Only*

1. Introdução

O presente capítulo tem como objetivo introduzir a dissertação de mestrado e encontra-se organizado em quatro secções. Na secção 1.1 é contextualizado o problema abordado no presente trabalho. A secção 1.2 enumera os objetivos propostos e na secção 1.3 é apresentada a metodologia adotada. A secção 1.4 encerra o capítulo com a descrição da estrutura da dissertação.

1.1. Contextualização do Problema

A Indústria Aeronáutica apresenta-se como um dos maiores setores de alta tecnologia, reconhecida pela elevada intensidade de Investigação e Desenvolvimento, pela integração de tecnologias inovadoras e pela propagação do conhecimento a muitos outros domínios, áreas e setores (OCDE, 2011). Ao longo dos últimos anos, têm sido várias as evidências do seu papel estratégico fundamental no desenvolvimento socioeconómico dos países: assegura a mobilidade adequada e sustentável dos passageiros, contribui para a segurança de bens e pessoas, gera riqueza e crescimento económico, contribui de forma significativa para o equilíbrio comercial e competitividade mundial, e promove o desenvolvimento de novas empresas e a criação de emprego (direto e indireto) altamente qualificado (European Commission, 2011).

De acordo com Esposito (2004), o sucesso da maior parte das empresas da indústria aeronáutica advém da existência de cadeias de abastecimento, enquanto redes complexas de relações de longo prazo estratégicas e operacionais, que influenciam a variedade, a produtividade e a qualidade dos produtos concebidos. A forte concorrência entre as empresas desta indústria, os elevados custos de desenvolvimento, os avanços tecnológicos, os longos tempos de entrega e os riscos inerentes aos projetos têm liderado a evolução destas cadeias. Conjugados com os atrasos verificados no desenvolvimento dos mais recentes modelos de aviões e com o aumento de custos associado, têm aumentado a complexidade das cadeias de abastecimento das empresas de produção de aviões e conduzido a sua reorganização ao longo dos tempos (Alfalla-luque et al., 2012). Esta problemática acarreta novos desafios para os fabricantes aeronáuticos e remete para estudo das suas cadeias de abastecimento, onde os aspetos de colaboração, sustentabilidade e resiliência são fundamentais (Brandeburgh et al., 2014).

Devido ao aumento da complexidade, da globalização e terceirização de atividades, as cadeias de abastecimento aeronáuticas encontram-se atualmente mundialmente dispersas, pelo que o fabrico de produtos de qualidade a um custo razoável deixou de ser uma estratégia suficiente para o aumento da competitividade. Surgem, assim, novas preocupações ao nível da tomada de decisão que incluem a adoção de iniciativas de desenvolvimento, produção e distribuição sustentáveis (Markley e Davis, 2007). A necessidade de inovação associada à introdução de novos materiais na estrutura do avião assume uma relevância fulcral e é identificada como um dos principais focos para o sucesso sustentado (Calantone et al., 2006; Avlonitis et al., 2001). Neste contexto, são apresentados os materiais compósitos, que têm liderado a evolução dos materiais aeronáuticos e o desenvolvimento de novos produtos e processos ao longo das últimas duas décadas. A potenciação das vantagens associadas a estes materiais e a compreensão das implicações associadas à sua introdução na cadeia de abastecimento no longo prazo é identificada como uma forma de reduzir custos, aumentar a produtividade e qualidade, e otimizar as cadeias de abastecimento aeronáuticas, tornando-as mais sustentáveis.

1.2. Objetivos da Dissertação

O trabalho apresentado assume dois objetivos principais:

- A caracterização das cadeias de abastecimento aeronáuticas, com a respetiva identificação dos seus principais desafios na atualidade, motivações e comportamento num contexto de desenvolvimento de novos produtos e tecnologias, com base no cenário de competitividade e inovação atual;
- A sistematização das principais tendências, características e informações de custo e ambientais relativas ao processo de introdução de novos materiais compósitos e respetivas tecnologias de produção na cadeia de abastecimento aeronáutica, de forma a alavancar o desenvolvimento de modelos analíticos de projeto e planeamento, enquanto ferramentas de apoio à decisão.

1.3. Metodologia Adotada

Apresenta-se nesta secção a metodologia adotada para o desenvolvimento da presente dissertação de mestrado, através da sequência de etapas enunciadas na Figura 1.

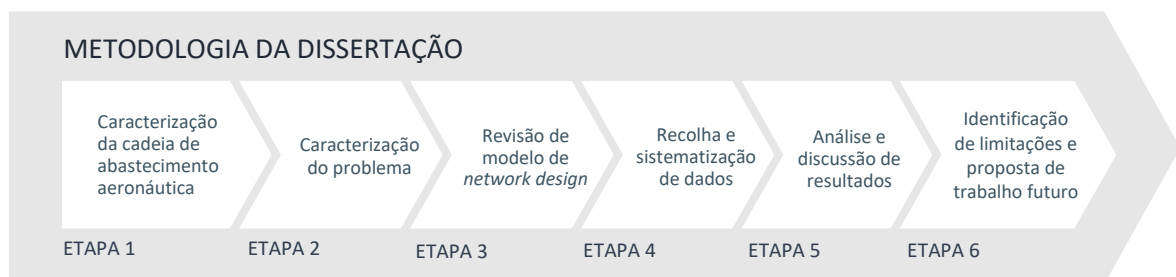


Figura 1 - Etapas da metodologia adotada na elaboração da dissertação de mestrado

- **Etapa 1 – Caracterização das cadeias de abastecimento aeronáuticas**
A primeira etapa tem como objetivo rever o estado de arte sobre Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas de forma a construir uma base teórica e fundamentada sobre o setor e, assim, identificar as abordagens sustentadas perante o problema identificado.
- **Etapa 2 – Caracterização do problema**
Nesta segunda etapa pretende-se conhecer a Embraer e estudar a sua cadeia de abastecimento e o seu cenário competitivo. Desta forma, torna-se possível identificar e caracterizar de forma clara e contextualizada o problema abordado no presente trabalho.
- **Etapa 3 – Revisão de modelos de *network design***
A etapa 3 visa explorar modelos relevantes na literatura - através das respetivas abordagens a decisões estratégicas e táticas envolvidas, bem como das principais métricas consideradas - que apresentem formulações genéricas adaptáveis à representação das características do problema.
- **Etapa 4 – Recolha e sistematização de dados**
Na quarta etapa pretende-se recolher informação, definir pressupostos e sistematizar os dados relevantes no contexto do problema apresentado, que permitam alavancar o desenvolvimento de modelos analíticos de projeto e planeamento.

- **Etapa 5 – Análise e discussão de resultados**

Esta etapa tem como objetivo analisar e discutir os resultados obtidos e que caracterizam alternativas importantes da introdução de novos materiais num contexto de sustentabilidade.

- **Etapa 6 – Identificação de limitações e proposta de trabalho futuro**

Trata-se da etapa final da metodologia, onde se pretende identificar as limitações do trabalho desenvolvido e elaborar uma proposta de trabalho futuro, de forma a dar continuidade aos desenvolvimentos alcançados na presente dissertação.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada de acordo com os seguintes capítulos:

- **Capítulo 1 – Introdução**

Consiste no presente capítulo, no qual o tema da dissertação é brevemente introduzido. Engloba o contexto do problema em estudo, os objetivos definidos, a metodologia adotada na realização da dissertação e a estrutura do documento elaborado.

- **Capítulo 2 – Caracterização das Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas**

São caracterizadas as cadeias de abastecimento aeronáuticas com base numa revisão bibliográfica. É analisada a evolução das cadeias de abastecimento aeronáuticas, são definidos os modelos de cadeias de abastecimento do presente e identificados os principais desafios atuais, através de uma visão holística da colaboração entre entidades, da sustentabilidade e da resiliência.

- **Capítulo 3 – Estudo de Caso: A Embraer**

É apresentada a Embraer, enquanto um dos principais fabricantes do setor aeronáutico. É analisada a sua cadeia de abastecimento com base no seu portefólio de aviões comerciais e no seu cenário competitivo atual. Surge introduzido o estudo de caso e é caracterizado o problema em análise.

- **Capítulo 4 – Otimização do Projeto e Planeamento das Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas**

É realizada uma breve introdução ao projeto e planeamento de cadeias de abastecimento aeronáuticas, com especial foco na etapa de network design. São explorados os modelos matemáticos de otimização de cadeias de abastecimento dos artigos mais relevantes da literatura e identificados os principais aspetos que deverão ser estudados, explorados e incluídos neste tipo de ferramentas, no contexto do desenvolvimento de novos produtos compósitos.

- **Capítulo 5 – Recolha e Tratamento de Dados**

É caracterizado de forma detalhada o problema em estudo, são descritos os procedimentos adotados na definição dos pressupostos e estratégias de simplificação da complexidade do problema e é desenvolvida a pesquisa e a recolha de dados pertinentes, aplicados ao estudo de caso da Embraer.

- **Capítulo 6 – Resultados e Discussão**

São analisados os resultados obtidos e comparadas as informações para os diversos cenários em estudo, de forma a potenciar o desenvolvimento futuro de modelos analíticos de suporte à decisão.

- **Capítulo 7 – Conclusões Finais e Trabalho Futuro**

Por fim, são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido e identificadas direções de trabalho futuro.

2. Caracterização da Cadeia de Abastecimento Aeronáutica

O presente capítulo tem como objetivo contextualizar o problema em estudo, fornecendo bases fundamentais para o trabalho desenvolvido na dissertação. Pretende-se, assim, analisar as principais características da indústria aeronáutica, bem como os desafios inerentes às cadeias de abastecimento de empresas de desenvolvimento e produção de aviões. O capítulo está organizado em seis secções. Na secção 2.1 é apresentada uma visão geral da indústria aeronáutica, são definidos os principais segmentos de mercado e perspectivas futuras de desenvolvimento. Na secção 2.2 é analisada a evolução das cadeias de abastecimento aeronáuticas e na secção 2.3 são caracterizados os modelos de cadeias de abastecimento indústria aeronáutica presentes na atualidade. Na secção 2.4 são abordados os principais desafios, onde se inserem os conceitos de colaboração, sustentabilidade e resiliência nas cadeias de abastecimento aeronáuticas. Na secção 2.5 é abordada a tendência de desenvolvimento de novos produtos na indústria aeronáutica, associada a materiais compósitos e sua respetiva introdução na cadeia de abastecimento aeronáutica. A secção 2.6 resume as principais conclusões do capítulo.

2.1. Indústria Aeronáutica

2.1.1. Visão Geral da Indústria

A Comissão Europeia define Indústria Aeronáutica enquanto indústria de desenvolvimento, produção e manutenção de aeronaves, nomeadamente aviões, jatos executivos, caças e helicópteros (Eurostat, 2009). Esta indústria surge como um segmento do setor Aeroespacial, também composto pela Indústria de Veículos Espaciais e pela Indústria de Mísseis (NAICS, 2015).

A Indústria Aeronáutica é um dos maiores setores de alta tecnologia (OCDE, 2011) reconhecida mundialmente pela elevada intensidade de Investigação e Desenvolvimento (I&D) e pela integração de tecnologias inovadoras, responsável pela propagação do conhecimento a muitos outros domínios, áreas e setores (Loschky, 2009). Ao longo dos últimos anos, este setor tem desempenhado um papel estratégico fundamental no desenvolvimento socioeconómico dos países: assegura a mobilidade adequada e sustentável dos passageiros; contribui para a segurança de bens e pessoas; gera riqueza e crescimento económico, devido à produção e comercialização de bens e serviços de elevado conteúdo tecnológico e valor unitário; contribui de forma significativa para o equilíbrio comercial e competitividade mundial; e promove o desenvolvimento de novas empresas e a criação de emprego (direto e indireto) altamente qualificado (European Commission, 2011).

A Aeronáutica apresenta-se como uma indústria de elevado valor acrescentado, com produtos de elevada complexidade, cuja atividade depende de milhões de componentes e partes dispersas globalmente em termos de indústrias e localizações (Niosi e Zhegu, 2005). O desenvolvimento e produção de novos produtos nesta indústria caracteriza-se pela existência de longos períodos de I&D e pelo elevado investimento inicial. Como tal, os aviões assumem um ciclo de vida bastante longo de forma a que os fluxos de caixa futuros consigam suportar os custos de desenvolvimento e garantir o retorno dos capitais investidos (Caetano, 2012) (Figura 2).

Em média, é necessário um período de cinco a dez anos para desenvolver um avião e aproximadamente 10 a 18 anos para que essa nova linha se torne rentável (Niosi e Zhegu, 2008). Apesar da vida útil (económica)

média de um avião ser aproximadamente vinte anos, este pode operar até um período de 50 anos, desde que sejam cumpridos os padrões de manutenção regulamentados (Cizmeci, 2005).

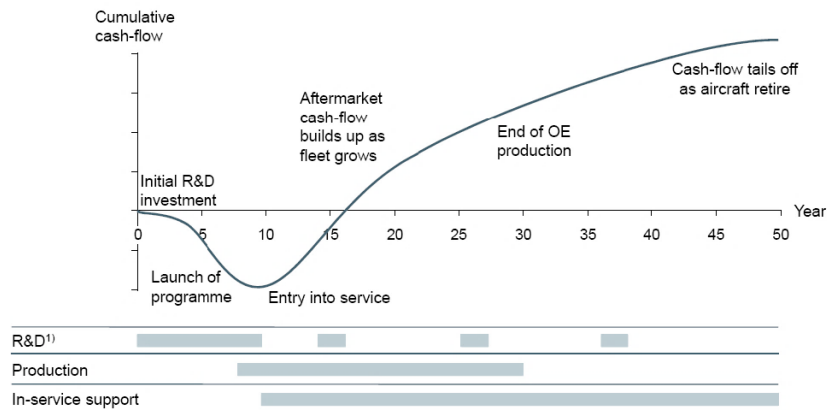


Figura 2 - Ciclo de vida de um novo programa-avião (ACARE, 2010)

Os requisitos de capital necessários para a concepção dos aviões, o elevado risco envolvido e a existência de rigorosas regulamentações e processos de certificação de aeronavegabilidade, constituem barreiras muito elevadas à entrada na Indústria Aeronáutica (Mowery e Rosenberg, 1989; Esposito, 2004). Como tal, a concentração económica no setor é muito elevada e em cada um dos seus segmentos existe apenas um pequeno número de concorrentes que dominam o mercado (Corallo et al., 2009).

2.1.2. Análise dos Segmentos de Mercado e Perspetivas Futuras da Indústria

Existem dois segmentos de mercado fundamentais na indústria Aeronáutica: o civil (ou comercial) e o militar (Niosi e Zhegu, 2005). De acordo com Cassiolato et al. (2002), estes dois segmentos apresentam diferentes dinâmicas económicas, tecnológicas, produtivas e logísticas. No entanto, a existência de desenvolvimento tecnológico comum e fornecedores transversais, bem como o facto de reagirem de forma complementar à maioria dos fatores de mudança, leva as empresas a criarem sinergias e a definir portefólios equilibrados entre produtos para aplicação civil e militar (Inteli, 2005).

O segmento civil assume uma maior presença no mercado e tem apresentado um maior crescimento ao longo das últimas décadas, devido essencialmente ao forte crescimento da aviação comercial (Schmitt, 2000). Atualmente representa a maior porção da indústria, com aproximadamente 75% das entregas mundiais de aeronaves, em valor (Figura 3).

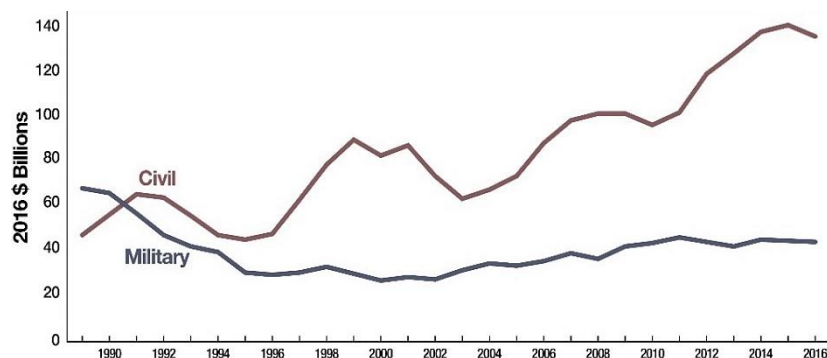


Figura 3 - Entregas mundiais de aeronaves, em valor, de 1989 a 2016 (Teal Group, 2017)

Os principais clientes do setor de aeronaves civis são as companhias aéreas, as empresas de leasing aeronáutico e as empresas de transporte aéreo de carga. De acordo com Niosi e Zhegu (2008), a procura pelas aeronaves deste mercado é fortemente cíclica e surge essencialmente como resposta às variações nos preços dos combustíveis, taxas de juro e aos ciclos da economia.

O segmento aeronáutico civil engloba atualmente uma vasta diversidade de aviões, com características e especificidades particulares. Como tal, é frequente encontrar na literatura diversas classificações para os produtos deste mercado, baseadas em diferentes critérios e atributos característicos dos aviões: número de turbinas, número de corredores (corredor único ou corredor duplo), capacidade de carga, entre outros (Montoro e Migon, 2009). No entanto, a divisão mais comum baseia-se no número de assentos e na autonomia de voo. De acordo com esta classificação, considera-se que o segmento de mercado de aviões civis se encontra dividido em três subsegmentos fundamentais: aviões comerciais de grande porte (*Large Commercial Aircraft*), aviões regionais e jatos executivos (Cizmeci, 2005; Cassiolato et al., 2002).

O subsegmento de **aviões comerciais de grande porte** é o maior em termos de receitas e o que lidera mundialmente as entregas às frotas das companhias aéreas (Figura 4). Atualmente é dominado por dois concorrentes principais, *The Boeing Company* (Boeing) e *Airbus SAS* (Airbus), verificando-se a existência de um duopólio (Horng, 2007). Segundo Cassiolato et al. (2002), os aviões deste subsegmento destinados quer ao transporte de passageiros apresentam um número de assentos superior a 120 e uma elevada autonomia de voo. No subsegmento de **aviões regionais**, são produzidos aviões de médio porte, com uma capacidade de passageiros inferior (entre 10 e 120 assentos), requisitados essencialmente para a cobertura de pequenas e médias distâncias. Existem várias empresas a atuar neste mercado, sendo que a *Embraer S.A.* (Embraer) e a *Bombardier Aerospace* (Bombardier) têm assumido uma posição de destaque e liderança ao longo dos últimos anos (Cappemini, 2011). O menor dos subsegmentos, mas com um franco crescimento verificado ao longo dos últimos anos, é de **jatos executivos**, que se apresenta como um mercado mais segmentado, caracterizado por um elevado número de empresas que produzem aviões de pequenas dimensões e que competem por diferentes nichos de mercado.

A Boeing, a Airbus, a Embraer e a Bombardier apresentam-se, assim, como os quatro principais fabricantes mundiais que dominam a produção de aviões a nível mundial (Guerra, 2011) (Figura 4).

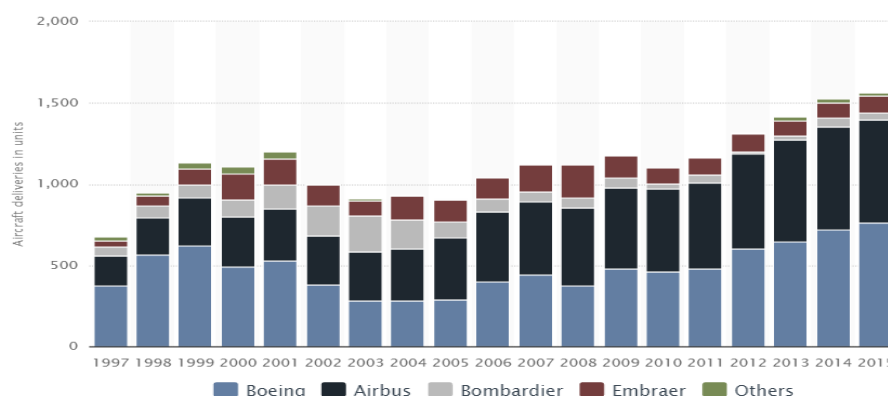


Figura 4 - Número de aviões entregues de 1997 a 2015, por produtor (adaptado de Statista, 2016)

Ao longo dos últimos anos, com as alterações nas dinâmicas do mercado, tem-se verificado uma evolução na definição tradicional de subsegmentos apresentada. De acordo com Cappemini (2011), atualmente as maiores produtoras de aviões regionais produzem já alguns modelos comparáveis aos menores aviões de

grande porte, da Boeing e da Airbus, possibilitando às companhias aéreas a realização de longos voos com uma capacidade de lugares elevada. A capacidade de inovação e o desenvolvimento de soluções tecnologicamente eficientes continuarão a fazer parte dos padrões de competitividade da indústria e a fomentar as tendências de desenvolvimento do setor aeronáutico no futuro.

O ano de 2016 contrariou as tendências da indústria aeronáutica verificadas nos últimos anos, com o segmento civil a refletir o impacto da recessão mundial bem como os desenvolvimentos macroeconômicos e geopolíticos negativos. Verificou-se, assim, o fim de um chamado “super-ciclo” de 12 anos de crescimento da indústria de produção de aviões (Teal Group, 2017). No entanto, a Aeronáutica continua a apresentar-se como o segmento mais saudável e atrativo da economia mundial, e as tendências apontam para um crescimento futuro, a verificar-se, inclusive, a partir de 2017. Estima-se, assim, que as vendas de aeronaves civis e os volumes de produção aumentem durante os próximos anos devido essencialmente à queda do preço do petróleo e ao crescimento do tráfego aéreo (Boeing, 2016).

De acordo com o estudo de 2016 da consultora Deloitte, sobre as perspetivas globais para a Indústria Aeronáutica, o combustível apresenta-se como um dos maiores custos operacionais das companhias aéreas comerciais. Com a redução contínua dos preços do petróleo verificada entre 2008 e 2015, assistiu-se a uma diminuição dos custos diretos operacionais das companhias aéreas (de 36% para 28%), que tem permitido uma redução do preço dos bilhetes em mercados selecionados e tornado o transporte aéreo atraente e acessível a milhões de pessoas. Segundo a *International Civil Aviation Organization*, o crescimento esperado do tráfego aéreo influencia diretamente a procura de aviões civis e, com base em dados históricos, estima-se que o tráfego aéreo duplique a cada 15 anos influenciado pelo crescimento de mercados emergentes, pela globalização, urbanização e crescimento da classe média. Espera-se que esta tendência se perpetue no futuro, com uma taxa de crescimento anual média de 4,7% (Airbus, 2016). A Boeing (2016b) prevê, assim, a necessidade de entrega de 38050 novos aviões ao mercado durante os próximos 20 anos.

As tendências de crescimento apresentadas têm impulsionado a produtividade e a eficiência das empresas da Indústria Aeronáutica, que ajustam a sua estratégia e os seus fatores produtivos em função das previsões obtidas (Boeing, 2016). Estas empresas encontram-se, assim, focadas no aumento do desempenho através da redução de inventários, racionalização de fábricas, automatização de processos, digitalização de sistemas e desenvolvimento de novos produtos, processos e materiais (*New Product Development*, NPD) (Capgemini, 2011; Deloitte, 2016; Strategy&, 2017). Num setor definido pela forte pressão na redução da estrutura de custos e pela exigência de produtos de qualidade e competitividade superior, o desenvolvimento futuro e a gestão eficaz das cadeias de abastecimento das empresas produtoras de aviões apresentam-se como fundamentais para a obtenção de vantagens competitivas.

2.2. A Evolução das Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas

De acordo com Esposito (2004), o sucesso da maior parte das empresas da indústria aeronáutica advém da existência de uma rede complexa de relações de longo prazo estratégicas e operacionais, envolvendo simultaneamente a colaboração e a concorrência, que influenciam a variedade e a qualidade dos produtos concebidos. Ao longo das últimas décadas, tem-se assistido a um aumento na pressão competitiva dos mercados abrangidos pela indústria aeronáutica, ainda que o valor das vendas desses mesmos mercados tenha apresentado uma forte tendência de crescimento (Rose-Anderssen et al., 2009; Ecorys, 2009).

Segundo o estudo de Alfalla-Luque et al. (2012) acerca da integração das cadeias de abastecimento no setor aeronáutico, a forte rivalidade entre as empresas desta indústria, os elevados custos de desenvolvimento (Esposito e Passaro, 2009), os avanços tecnológicos (Reed and Walsh, 2002), os longos *lead-times* (O'Neill e Sackett, 1994) e os riscos inerentes aos projetos (Zsidisin e Smith, 2005) têm liderado a evolução das cadeias de abastecimento aeronáuticas. Estes fatores, conjugados com os atrasos verificados no desenvolvimento dos mais recentes modelos de aviões e com o aumento de custos associado, têm aumentado a complexidade das cadeias de abastecimento das empresas de produção de aviões e conduzido a sua reorganização ao longo dos tempos (Bales et al., 2004).

A evolução dos processos, as relações e a interação entre os principais intervenientes nas cadeias de abastecimento são consideradas fundamentais para o desenvolvimento de vantagens competitivas. Esta evolução, que tem permitido a adaptação das cadeias de abastecimento aeronáuticas, pode ser caracterizada através de períodos e passos evolutivos, verificados no passado (Rose-Anderssen et al., 2008).

De acordo com Petrick (2007), as estruturas organizacionais das cadeias de abastecimento atuais das empresas de produção e desenvolvimento de aviões apresentam, à semelhança de outras indústrias desenvolvidas, a sua origem baseada na evolução das organizações envolvidas na produção de bens e consumo. Segundo o estudo desenvolvido pelo autor, o modelo atual generalizado para as cadeias de abastecimento aeronáuticas solicita a análise de uma perspetiva histórica, sendo esta responsável pela alteração das motivações, procedimentos, gestão do conhecimento e relações estabelecidas entre as diferentes entidades envolvidas na cadeia de abastecimento. Petrick destaca, assim, a evolução dos modelos de produção e fabrico, do passado à atualidade incluindo uma perspetiva futura, onde é possível identificar seis períodos fundamentais (Figura 5).

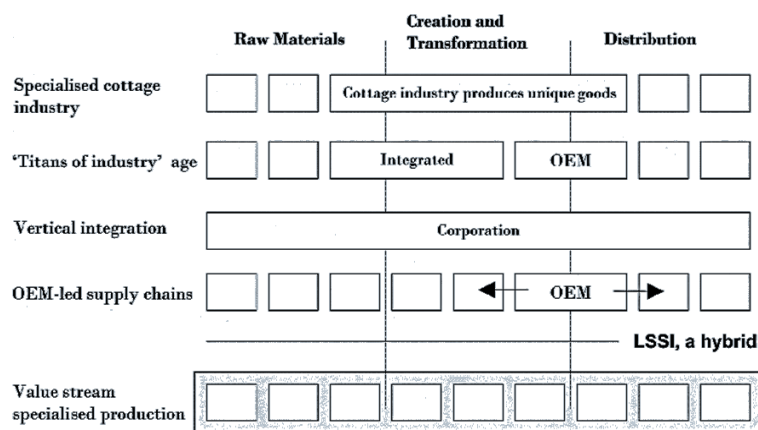


Figura 5 - Evolução dos modelos de produção e fabrico (adaptado de Petrick, 2007)

A caracterização destes períodos e dos fatores de mudança e características associadas, ainda que de certa forma generalista, permite introduzir e compreender os conceitos fundamentais para a definição das cadeias de abastecimento aeronáuticas atuais. A indústria aeronáutica é conhecida pela estrutura característica das suas cadeias de abastecimento, organizadas hierarquicamente por níveis (Niosi e Zhegu, 2005). Com o auxílio dessa estrutura piramidal torna-se intuitivo perceber e identificar as principais relações entre os diferentes intervenientes na cadeia de abastecimento. Oliveira (2005) incluiu também nos seus estudos das cadeias de abastecimento aeronáuticas a representação da evolução deste tipo de cadeias através da adaptação da estrutura piramidal hierárquica da indústria. Como tal, pretende-se no presente subcapítulo complementar a literatura, conjugando o estudo da evolução das estruturas organizacionais

das cadeias de abastecimento de Petrick (2007) com a contribuição de Oliveira (2005), e caracterizar a evolução das cadeias de abastecimento aeronáuticas com um nível de detalhe superior através da inclusão de características específicas e particulares do setor. Com esta análise, torna-se possível melhorar a compreensão das mudanças passadas, caracterizar as cadeias de abastecimento aeronáuticas dos principais atores no presente e perceber quais as referências para discutir cenários futuros.

As primeiras referências acerca de desenvolvimentos industriais consideráveis surgem associadas à **especialização de diversas indústrias artesanais** (*specialised cottage industries*) (Petrick, 2007), estimuladas pelo crescimento do mercado internacional de consumo, com o auxílio de trabalhadores qualificados e acesso exclusivo a clientes e tecnologias (Mendels, 1972). Posteriormente, sucedeu-se a era dos chamados “**Titans da Indústria**” que, com o acesso a matérias-primas e o auxílio de máquinas e ferramentas mais desenvolvidas, dominaram as indústrias artesanais especializadas, através de economias de escala (Chandler, 1992). Verificou-se neste período uma segmentação entre as empresas das diferentes indústrias (entre as quais a indústria aeronáutica), com empresas focadas na transformação de matérias-primas em produtos e empresas especializadas na montagem desses produtos num único produto final complexo entregue posteriormente ao mercado (Figura 6-A). Este processo de evolução conduziu à origem do conceito de *Original Equipment Manufacturer* (OEM) que se mantém atualmente na designação dos fabricantes de aviões, bem como à organização por níveis dos diferentes fornecedores, fundamentais no fornecimento de peças e componentes, utilizados posteriormente no fabrico das principais partes do avião.



Figura 6-A - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: Era dos "Titans da Indústria" (adaptado de Oliveira, 2005)

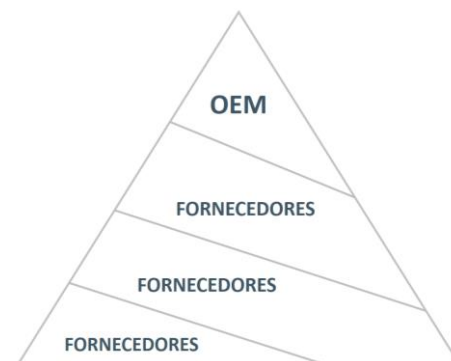


Figura 6-B - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: Elevada integração vertical (adaptado de Oliveira, 2005)

Com o passar do tempo, muitas das organizações encontraram uma nova forma de crescimento, através da integração das suas cadeias de abastecimento a jusante, assumindo controlo na venda e distribuição, e a montante, controlando o acesso e a disponibilidade das matérias-primas e dos diferentes componentes (Figura 6-B). Surgiram, assim, **cadeias de abastecimento verticalmente integradas**, “com domínio sobre a produção, gestão de inventários, investigação e desenvolvimento, marketing e estratégia de negócio orientada para a diversificação geográfica e multiplicidade de produtos” (Nelson e Winter, 1982).

Ao longo das últimas décadas diferentes desenvolvimentos moldaram a estrutura das cadeias de abastecimento aeronáuticas. A procura pelos produtos deste setor aumentou a nível mundial, foram introduzidos novos modelos de projeto (*design*) de aviões baseados na constituição de módulos, e aumentou a disponibilidade e a facilidade de acesso a empresas especializadas e complementares um pouco por todo mundo. Como tal, as organizações verticalmente integradas, e nomeadamente os OEMs, começaram a consciencializar-se que para a obtenção de vantagens competitivas deveriam focar-se nas suas competências principais (competências *core*), direcionando os seus recursos para as tecnologias e

processos essenciais, e proceder à terceirização de serviços e produções não essenciais, como por exemplo a contabilidade e os recursos humanos (Prahalad e Hamel, 1990). Segundo Petrick (2007), estes fatores permitiram uma especialização e segmentação dos diferentes fornecedores da cadeia de abastecimento aeronáutica, nomeadamente em fornecedores de peças e componentes e fornecedores de subsistemas, que responderiam a requisitos e normas específicas, estabelecidas pelos OEMs. Estes, por sua vez, procederiam posteriormente à integração de alguns módulos e consequente montagem de todos os módulos num único produto final, mantendo a responsabilidade pela conceção, engenharia e desenvolvimento do produto. A transformação e o desenvolvimento gradual das relações estabelecidas conduziram, assim, a um novo período histórico, onde os OEMs assumem um papel crucial e fundamental e lideram toda a cadeia de abastecimento aeronáutica (**OEM-Lead Supply Chains**) (Figura 6-C).

De acordo com Bozarth et al. (2009), a complexidade de um avião apresenta-se por si só como um elemento chave determinante da complexidade da cadeia de abastecimento aeronáutica. Aliada à projeção deste produto através de módulos, verificou-se um acréscimo dessa complexidade, que influenciou a estrutura da cadeia de abastecimento e se traduziu em maiores dificuldades na sua coordenação e no aumento de custos (Novak e Eppinger, 2001). Os fornecedores de países em desenvolvimento, por assumirem remunerações salariais inferiores, apresentaram uma vantagem competitiva relativamente às empresas mais tradicionais localizadas em países desenvolvidos. De forma a reduzir os custos globais associados à cadeia de abastecimento, e dada a dispersão geográfica dos diferentes fornecedores, foi incentivada a prática de *off-shoring* que tornou a cadeia de abastecimento aeronáutica global e foram estabelecidas parcerias de risco com os principais fornecedores do nível 1 (Figura 6-C).



Figura 6-C - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: "OEM lead supply chain" (adaptado de Oliveira, 2005)



Figura 6-D - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica: Tendência do modelo integrador de sistemas (LSSI) (adaptado de Oliveira, 2005)

Segundo o estudo de Petrick (2007), ilustrado na Figura 5, o último período enunciado como "*Value stream specialised production*", apresenta-se como uma possível tendência futura liderada pela colaboração e coordenação de toda a cadeia de abastecimento. Este modelo é caracterizado pelo "**fluxo de valor especializado**", onde cada uma das empresas envolvidas adiciona valor, através de capacidades únicas e distintivas, a uma rede especializada de produção. No entanto, e em oposição ao modelo liderado pelo OEM apresentado anteriormente, nenhuma das empresas controla as atividades inerentes à cadeia de abastecimento. "Existem objetivos partilhados, auxiliados pelas tecnologias de informação, antecipação das necessidades de comunicação, apoio em atividades de planeamento, *design* colaborativo, previsão da procura agregada e consequentes necessidades de fluxo produtivo entre empresas" (Lancioni et al., 2003).

Atualmente verifica-se que algumas das cadeias de abastecimento aeronáuticas apresentam um modelo híbrido, conjugando simultaneamente características comuns ao modelo liderado pelo OEM e ao modelo de fluxo de valor especializado. É, assim, identificado um novo modelo, de nome *Large Scale System Integrator* (LSSI) (Figura 6-D). Neste modelo, o OEM assume o papel de integrador de sistemas produzidos noutras localizações, desvalorizando a sua própria capacidade produtiva. Encontra-se antes focado na conceção do produto final, trabalhando de forma colaborativa com os fornecedores para o obter. Esta tem sido a visão demonstrada pelas empresas que adotaram este modelo. No entanto, esta transição do modelo liderado pelo OEM para o modelo LSSI apresenta inúmeras alterações ao nível da cadeia de abastecimento, com desafios e decisões estratégicas consideráveis, que se detalham nas secções seguintes.

2.3. As Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas Atuais

As relações estabelecidas entre as diferentes entidades envolvidas no desenvolvimento e produção de aviões conduziram ao longo do tempo a evolução das cadeias de abastecimento e a consequente adoção de modelos estruturados, adaptados aos desafios específicos do setor. Atualmente verifica-se a existência de dois modelos fundamentais de cadeias de abastecimento aeronáuticas: o modelo liderado pelo OEM e o modelo integrador de sistemas - LSSI (introduzidos anteriormente na secção 2.2) (Malarranha et al., 2017). A Figura 7 representa as estruturas das cadeias de abastecimento destes modelos, através da adaptação do modelo elaborado por Beelaerts et al. (2010).

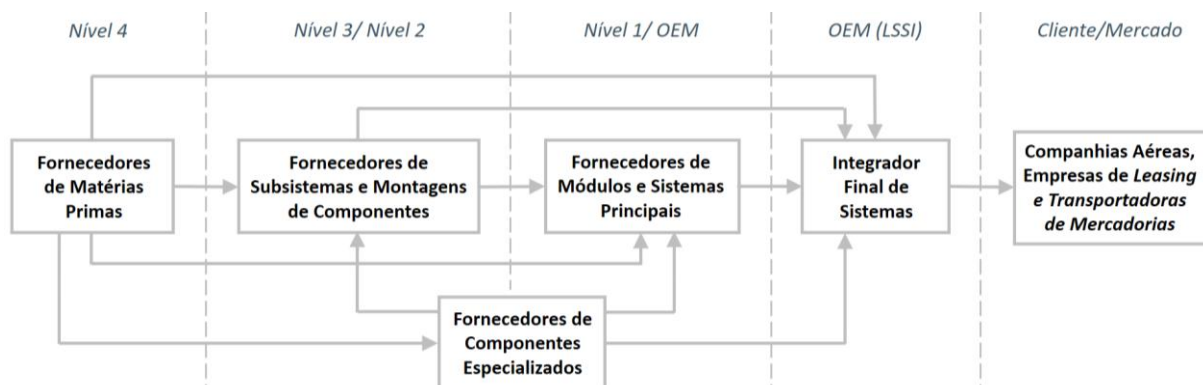


Figura 7 - Cadeia de Abastecimento Aeronáutica (adaptado de Beelaerts et al., 2010)

Os principais fabricantes de aviões atuam segundo uma estratégia de fornecimento *make-to-order*, num ambiente tipicamente *pull*, onde a procura é incerta (Ghadge et al., 2010). Assim, e de forma a corresponder às condições exigidas pelo mercado, as cadeias de abastecimento aeronáuticas necessitam de uma estrutura dinâmica que lhe permita obter vantagens competitivas no desenvolvimento de programas e famílias de aviões. De facto, um fabricante de aviões não possui apenas uma cadeia de abastecimento estática e transversal a todos os modelos desenvolvidos. A cadeia de abastecimento encontra-se diretamente associada a um programa específico e, como tal, questões relacionadas com fornecedores, contratos estabelecidos e modos de transporte utilizados, podem variar de acordo com as características e objetivos pretendidos (Horng, 2007; Fontes, 2004). Além disso, verifica-se frequentemente o desenvolvimento de famílias de aviões – correspondentes a um conjunto de várias versões de um mesmo modelo base, que permitem aos fabricantes reduzir custo e beneficiar desenvolvimentos mais rápidos e

menores ciclos de produção, que se traduzem numa redução do tempo de colocação dos aviões no mercado (*time-to-market*) e respetivo aumento do valor para o cliente (Cassiolato et al., 2002).

O mercado é representado pelos clientes finais, como companhias aéreas, empresas de leasing aeronáutico ou empresas de transporte aéreo, que se encontram, assim, a jusante dessas cadeias, sendo responsáveis pela compra de aviões do segmento civil. Estes clientes desencadeiam todo o processo produtivo, impulsionando a competitividade da indústria, o desenvolvimento tecnológico dos grandes produtores e a redução dos custos operacionais.

Os grandes produtores, que se apresentam como **OEMs** (i.e., Boeing, Airbus, Embraer e Bombardier), asseguram a montagem final do avião, através da integração de todos os sistemas principais, conduzindo posteriormente o processo de comercialização e venda aos clientes finais.

Os OEMs são suportados por uma vasta rede de fornecedores, estruturados hierarquicamente por níveis (Niosi e Zhegu, 2008). No **primeiro nível** (*tier 1*), encontram-se os fornecedores que se dedicam à conceção, desenvolvimento e produção de módulos e integração de alguns sistemas principais (Hornig, 2007). Estes módulos podem ser segmentados em três grupos fundamentais:

- Sistemas de aeroestruturas: sistemas estruturais que constituem a parte visível (i.e., a armação) do avião, tipicamente fabricados de alumínio, titânio e materiais compósitos (Cizmeci, 2005). Entre as principais aeroestruturas de um avião, encontram-se as fuselagens, as asas e o trem de aterragem;
- Sistemas de aviónica: conjunto de sistemas e equipamentos que realizam funções de comunicação, navegação, controlo automático de voo, entre outras (Guerra, 2011);
- Sistemas de propulsão: apresentam-se como os mais dispendiosos sistemas do avião, correspondendo a cerca de 30% do seu custo total (Bonaccorsi e Giuri, 2000).

Os fornecedores do primeiro nível têm vindo a assumir um papel cada vez mais importante na cadeia de abastecimento, sendo em muitos dos casos, responsáveis pela gestão e coordenação dos níveis subjacentes (Tang e Zimmermen, 2009).

Os fornecedores do **segundo nível** por sua vez, dedicam-se ao desenvolvimento e fabrico de subsistemas e equipamentos complexos com muitos componentes, tais como aeroestruturas, sistemas elétricos, sistemas de refrigeração, sistemas de comunicação, sistemas de travagem, que são posteriormente transferidos para fornecedores de nível 1 ou para o OEM e incorporados na produção dos sistemas principais.

No **terceiro nível** encontram-se os fornecedores de peças ou de montagens, subcontratados que fabricam ou fornecem componentes e subconjuntos menores. Estes fornecedores auxiliam principalmente os fornecedores do nível 2 (e por vezes do nível 1) e muitas outras empresas do nível 3. Tem-se revelado, no entanto, cada vez menos frequente o fornecimento direto ao OEM. Em alguns casos, verifica-se a atuação de um mesmo fabricante como fornecedor do nível 3 e do nível 2 simultaneamente, através da produção de subconjuntos incorporados de seguida na conceção de subsistemas.

No **quarto nível 4** (e níveis subjacentes) encontram-se os fornecedores de matérias-primas (como o alumínio titânio, aço e compósitos), peças e componentes (e serviços de processamento de componentes como tratamento térmico, revestimento), essenciais para os fornecedores de nível 2 e nível 3 e até mesmo por alguns integradores de sistemas. O número de fornecedores no nível 4 pode ascender a centenas em muitas das cadeias de abastecimento de aviões civis, sendo que muitas delas não trabalham exclusivamente com o setor aeronáutico (Niosi e Zhegu, 2005).

As relações e dependências verificadas entre os fornecedores da cadeia de abastecimento aeronáutica, desde o primeiro nível aos níveis subjacentes, bem como a elevada flexibilidade e capacidade de resposta exigida, têm contribuído para uma cadeia de abastecimento *lean*, para a redução da variabilidade e dos riscos de produção (Michaels, 1999). Como tal, tem-se verificado o desenvolvimento de relações cada vez mais integradas entre compradores e fornecedores (Graham e Ahmed, 2000).

Num mercado caracterizado pela forte competitividade e qualidade de excelência do produto final, é fundamental garantir que todas as peças e componentes necessários sejam produzidos e entregues no tempo ideal, de forma a alimentar toda a estrutura de sistemas completos e montagens finais (Williams et al., 2002). Os fabricantes (OEMs) ambicionam, assim, responder rapidamente à procura verificada e aumentar a agilidade da cadeia de abastecimento, reduzindo os tempos de espera dos seus clientes através da minimização do *lead time* total (Vrijhoef, 2011).

Ao longo dos últimos anos, com o aumento da complexidade tecnológica dos aviões, têm-se verificado esforços por parte dos OEMs no sentido da redução da complexidade da cadeia e da produção, através do aumento do nível de modularização do produto (Laframboise e Reyes, 2007). Consequentemente, existe atualmente uma forte dependência das operações de montagem final com a respetiva integração de sistemas principais (Bales et al., 2004). A Figura 8 representa a montagem final de um avião através do processo tradicional de montagem total, adotado por alguns dos fabricantes.

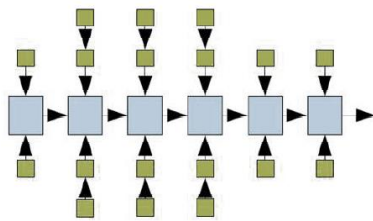


Figura 8 - Montagem final de um avião: processo de montagem total (Beelaerts et al., 2010)

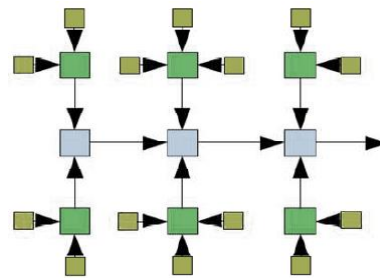


Figura 9 - Montagem final de um avião: processo de integração de sistemas principais (Beelaerts et al., 2010)

Os diferentes módulos e subsistemas eram transportados para as instalações do OEM e utilizados no local, incorporados na montagem final do avião. A montagem final era, assim, considerada um processo extremamente complexo e de elevada duração temporal. Com o aumento da modularização, a montagem final transformou-se num processo essencialmente de montagem de todos os sistemas principais do avião, previamente integrados (Figura 9). Este processo tornou possível a redução da complexidade da montagem final e respetiva duração total da operação (Beelaerts et al., 2010).

No modelo da cadeia de abastecimento liderada pelo OEM (*OEM-Lead Supply Chain*), o OEM assume responsabilidade na integração de alguns dos módulos principais (como por exemplo, a integração de toda a asa) e posterior montagem de todos os módulos num único produto final (conforme representado na Figura 7). Este modelo encontra-se atualmente presente nas cadeias de abastecimento da Bombardier e da Embraer (Beelaerts et al., 2012). Além do desenvolvimento do projeto e montagem final dos seus aviões, a Embraer fabrica também sistemas de aeroestruturas, como por exemplo segmentos da fuselagem, e alguns componentes, como tubos e cablagens (Williams et al., 2002; Guerra, 2011). No entanto, com o desenvolvimento do modelo Boeing 787, também denominado "*Dreamliner*", e posteriormente do modelo A380 da Airbus, a cadeia de abastecimento aeronáutica sofreu alterações estruturais, não só através da

alteração do processo de montagem final do avião, mas também ao nível do papel desempenhado pelo OEM nesse mesmo processo (Rose-Anderssen et al., 2009).

As decisões relativas aos diferentes componentes e subsistemas passaram a ser totalmente centralizadas em fornecedores de nível 1, dispersos globalmente, que assumem a responsabilidade por determinados segmentos da cadeia de abastecimento, bem como pela gestão das relações com os níveis de fornecedores subjacentes e respetivas operações (Tang e Zimmermen, 2009). Posteriormente, segue-se o envio destes sistemas completos (como as asas ou a fuselagem) para o OEM (Beelaerts et al., 2010). Desta forma, no modelo LSSI, uma parte da montagem foi transferida para os níveis de fornecedores subjacentes, reduzindo a capacidade produtiva do OEM necessária na última fase (Morton et al., 2006). Com este novo modelo, o OEM passou a focar-se exclusivamente na integração e montagem final do avião, conforme representado na Figura 9. Segundo a Boeing (2011), um dos principais objetivos da adoção deste novo processo, ao nível produtivo, foi a redução da duração da fase de montagem final do avião de trinta para apenas três dias. Apesar de ser considerada pioneira neste processo de transformação da cadeia de abastecimento, a Boeing tem sido atualmente acompanhada pela Airbus (Ecorys, 2009). Além disso, e de acordo com os mais recentes desenvolvimentos, verifica-se que também a Embraer e a Bombardier pretendem adotar no futuro uma estratégia semelhante e seguir, assim, esta tendência.

Em suma, o modelo LSSI é considerado uma evolução do modelo liderado pelo OEM, onde as principais diferenças surgem associadas aos requisitos acentuados de coordenação e colaboração necessários para a obtenção de sucesso. Os fabricantes procuram reduzir custos, melhorar a produtividade e a qualidade, e aumentar a rapidez e a flexibilidade das suas cadeias de abastecimento (Smith e Tranfield, 2005). Como tal, para atingir todos estes objetivos, o OEM deverá estabelecer políticas de coordenação e colaboração que possam ser perpetuadas em toda a cadeia de abastecimento, de forma a assegurar que as decisões estratégicas e os investimentos dos fornecedores complementam os objetivos do OEM (Petrick, 2007). Esta transição para o modelo LSSI acarreta, assim, vários desafios e despoleta novos objetivos e tendências nas cadeias de abastecimento aeronáuticas, introduzidas na secção 2.4 do presente capítulo.

2.4. Os Desafios das Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas

Os principais fabricantes de aviões comerciais encontram-se atualmente empenhados na conceção, desenvolvimento e produção de novos modelos, que proporcionem uma melhor experiência de voo aos passageiros e correspondam às expectativas das diferentes operadoras (Tang e Zimmermen, 2009). Estas, por sua vez, procuram aviões mais eficientes, projetados para um menor consumo de combustível, baixas emissões de gases, descolagens e aterragens mais silenciosas, e uma maior velocidade de cruzeiro (ICAO, 2011; Mrazova, 2013). De forma a atingir este nível exigido de desempenho excepcional, os fabricantes têm estabelecido verdadeiras equipas globais, constituídas por fornecedores dispersos globalmente, com conhecimento, tecnologia e capacidade para projetar componentes-chave do avião. Com esta nova estrutura global, e com a respetiva adoção do modelo LSSI (modelo integrador de sistemas) surgem novas tendências, objetivos e desafios nas cadeias de abastecimento aeronáuticas.

A Tabela 1 resume os principais objetivos da estratégia atual das cadeias de abastecimento dos fabricantes de aviões, identificados a partir da análise de Exostar (2007), Boeing (2016), Airbus (2016).

Tabela 1 - Principais objetivos estratégicos das cadeias de abastecimento aeronáuticas (adaptado de Exostar, 2007; Boeing, 2016; Airbus, 2016)

Principais objetivos da estratégia atual das cadeias de abastecimento aeronáuticas
<ul style="list-style-type: none">▪ Seleção dos melhores fornecedores do mundo de tecnologia e sistemas específicos, que possibilitem o desenvolvimento de novos modelos com as características pretendidas;▪ Estabelecimento de um modelo de risco partilhado entre o fabricante e os seus fornecedores parceiros (denominados parceiros de risco) que permita dar resposta a potenciais perturbações;▪ Sincronização e centralização da informação de todos os fornecedores do primeiro nível relativa à procura, fornecimento, pedidos e inventários;▪ Definição de um conjunto de processos logísticos e mecanismos de transporte altamente coordenados em toda a cadeia de abastecimento, de forma a garantir a entrega <i>on-time</i> de todos os sistemas necessários para a montagem final;▪ Redefinição das competências core do fabricante com especial foco nas preocupações dos diferentes <i>stakeholders</i>;▪ Maximização dos benefícios dos produtos finais através da minimização do impacto ambiental da sua fabricação e operação;▪ Colaboração ao longo de toda a cadeia de abastecimento de forma a corresponder às regulamentações ambientais em vigor e superar os principais desafios ambientais do futuro.

Estes objetivos refletem ainda os desafios dos principais fabricantes de aviões, através de uma produção *lean*, da integração dos fornecedores a montante da cadeia de valor nas etapas de projeção e desenvolvimento, do fluxo sincronizado ao longo de toda a rede de fornecedores, da visibilidade e transparência com base na comunicação aberta, e das relações de longo prazo baseadas em confiança, mutuamente benéficas para o desenvolvimento e melhoria contínua (Hornig, 2007).

De forma a analisar os objetivos supramencionados revela-se pertinente o agrupamento dos desafios das cadeias de abastecimento aeronáuticas atuais em três categorias fundamentais, nomeadamente, a colaboração, a resiliência e a sustentabilidade.

2.4.1. A Colaboração nas Cadeias de Abastecimento Aeronáutica

Com a adoção do modelo LSSI as cadeias de abastecimento aeronáuticas revelam não só apenas alterações ao nível da produção como também, e essencialmente, um especial foco na colaboração e nas relações estabelecidas entre os diferentes fornecedores. De acordo com Petrick (2007), a colaboração é definida como um nível superior de coordenação, refletindo-se em oportunidades estruturadas de discussão e partilha de informação. Através da colaboração, os principais fabricantes procuram alavancar a cadeia de abastecimento e os recursos produtivos dos seus parceiros, e obter uma vantagem competitiva através da redução de custos, do tempo de colocação no mercado (*time-to-market*) e aumento do valor para o cliente. A tendência dos atuais modelos de cadeias de abastecimento reflete uma produção maioritariamente por fornecedores globais (Gates, 2005), sendo posteriormente entregue sob a forma de grandes sistemas completos que o OEM monta e testa nas suas instalações principais (Holmes, 2005). Ao operar ao nível da montagem final do avião, a coordenação de todos os parceiros e sistemas distribuídos mundialmente torna-se imprescindível e fundamental para o sucesso de toda a operação. Os fabricantes necessitam ainda de sincronizar todas as informações relativas à procura, fornecimento e logística ao longo dos vários níveis de fornecedores, de forma a que os componentes-chave cheguem às instalações principais no momento certo da montagem final. Verifica-se desta forma uma alteração nas competências *core* do OEM bem como no

papel desempenhado pelos diferentes níveis de fornecedores, que mantêm relações estratégicas com o fabricante, num cenário composto por uma cadeia de abastecimento global (Tang e Zimmermen, 2009).

Competências Core do OEM

A complexidade inerente à cadeia de abastecimento aeronáutica e a tendência de desintegração vertical onde o OEM se assume como integrador de sistemas principais, tem levado os fabricantes a redefinirem as suas responsabilidades, seguindo a tendência verificada na indústria automóvel (A.T.Kearney, 2003). O OEM deixou de realizar atividades que tradicionalmente executava e encontra-se agora focado apenas em atividades específicas, associadas às suas competências essenciais (*core*). Estas competências permitem o desenvolvimento de atividades e tecnologias que adicionam valor ao produto final, diferenciam o fabricante dos seus concorrentes e fortalecem a posição da empresa (Hamel e Prahalad, 1990). De acordo com Guerra (2011), a tendência atual reflete que os principais fabricantes de aviões se encontram interessados em manter internamente cinco competências fundamentais:

- **Marketing:** gestão da marca, contacto com clientes atuais e potenciais, realização de apresentações e participação em feiras;
- **Desenvolvimento do produto:** definição dos requisitos básicos nas etapas iniciais de desenvolvimento do produto; desenvolvimento de novas tecnologias e materiais (responsabilidade compartilhada com os fornecedores); gestão da comunicação e informação entre todas as partes envolvidas no desenvolvimento; coordenação das diferentes equipas de forma a garantir a total integração entre todos os sistemas; responsabilidade legal pela certificação total do avião através do contacto com governo e agências de certificação (Figueiredo et al., 2008);
- **Montagem final,** testes e respetiva entrega ao cliente: controlo e gestão de todo o processo produtivo de modo a garantir a receção dos sistemas principais enviados pelos fornecedores *on-time*; realização da montagem final e do avião (com procura constante pela melhoria e otimização das tecnologias e processos utilizados nestas fases); definição de planos de contingência para possíveis atrasos e eventuais problemas; realização de testes ao avião final (Cassiolato, 2002);
- **Comercialização:** venda dos aviões produzidos, com respetiva gestão do financiamento e elaboração do contrato de venda;
- **Serviços de apoio ao cliente:** formação a engenheiros, técnicos e pilotos; publicações técnicas; e alguns serviços de manutenção, reparação e revisão (Guerra, 2011).

Através do foco nas competências core, os fabricantes de aviões transferem várias atividades (de elevada relevância) para os seus fornecedores. Esta alteração de competências do OEM envolve uma elevada complexidade e realça a importância da colaboração entre as partes envolvidas. Além disso, muitos dos fornecedores passarão a assumir um papel fundamental na cadeia de abastecimento, através da projeção, desenvolvimento e produção, bem como responsabilidade pelos riscos e custos associados.

O Papel dos Fornecedores na Cadeia de Abastecimento Aeronáutica

As cadeias de abastecimento aeronáuticas atuais dependem de mecanismos de colaboração entre as diferentes entidades envolvidas e seguem um conjunto de práticas que diferem relativamente aos vários tipos de fornecedores. Segundo Laseter e Ramdas (2002), é possível classificar os diferentes fornecedores da indústria aeronáutica de acordo com o custo, complexidade e impacto do subsistema que produzem na obtenção do produto final (Tabela 2).

Tabela 2 - Papel dos fornecedores na cadeia de abastecimento aeronáutica (adaptado de Laseter e Ramdas, 2002)

Impacto no Produto Final	Custo e Complexidade	
	Baixo	Alto
Não contribui para a Diferenciação	Fornecedores de <i>commodities</i> (baixa influência)	Fornecedores estratégicos (influência moderada)
Contribui para a Diferenciação	Fornecedores de valor agregado (influência moderada)	Colaboradores-chave (elevada influência)

Os **fornecedores de *commodities*** produzem componentes de custo relativo reduzido (em quantidades necessárias), cuja complexidade não contribui para a diferenciação do produto final. Estes fornecedores encontram-se frequentemente no nível 4 (e níveis subjacentes) e apresentam uma influência reduzida na cadeia de abastecimento aeronáutica. Os componentes que apresentam um baixo custo e baixa complexidade, mas que contribuem para a diferenciação do avião no mercado, são produzidos por **fornecedores de valor agregado**, que apresentam uma influência moderada na cadeia de abastecimento. Estes fornecedores, associados normalmente ao nível 2 ou nível 3 da cadeia (dependendo do componente), são, assim, denominados pelo facto de agregarem valor ao produto final e ao OEM, por possuírem conhecimentos técnicos específicos ou por possuírem uma elevada capacidade de antecipação de oportunidades e soluções. Os **fornecedores estratégicos** por sua vez, são aqueles que fornecem subsistemas de elevado custo ou altamente complexos. Estes subsistemas não apresentam diferenciação, uma vez que o cliente não reconhece a diferença do produto de um fornecedor relativamente a outro. No entanto, dado que o custo relativo ou a complexidade desses subsistemas afeta o preço do avião final, considera-se que o fornecedor estratégico assume uma influência moderada. Estes fornecedores encontram-se normalmente no nível 2 devido à complexidade dos subsistemas (Petrick, 2007).

Por fim, existem ainda outros fornecedores, que dada a sua elevada influência na cadeia de abastecimento e relação próxima com o OEM, são denominados **colaboradores-chave**. Estes fornecedores encontram-se no primeiro nível da cadeia, são responsáveis pela integração de sistemas principais e envio para o OEM (que se dedica à montagem final) e auxiliam a conceção e o desenvolvimento. Os colaboradores-chave assumem ainda um papel fundamental na colaboração entre o OEM e os fornecedores dos níveis a jusante, através da gestão e coordenação da produção dos sistemas principais (Laseter e Ramdas, 2002).

Nas cadeias de abastecimento aeronáuticas dos principais fabricantes de aviões, o sucesso da transição do modelo liderado pelo OEM para o modelo LSSI passa por uma escolha eficaz dos colaboradores-chave. A seleção dos colaboradores-chaves inclui não só a escolha das capacidades desses colaboradores, como também a seleção de toda a cadeia de abastecimento e rede de colaboradores associada a esses fornecedores. Para o sucesso da colaboração entre as diferentes partes envolvidas na cadeia de abastecimento aeronáutica, cabe ao OEM determinar os tipos de práticas que melhor se ajustam às várias atividades da base de fornecedores e quais as relações que deverá estabelecer com esses fornecedores, de forma a alcançar vantagens competitivas sustentáveis.

Alianças Estratégicas: o Poder das Parcerias de Risco

Um dos exemplos de colaboração nas cadeias de abastecimento aeronáuticas surge através do estabelecimento de alianças estratégicas. Na literatura, verifica-se a existência de várias definições para este conceito. No entanto, é de destacar a contribuição de Eiriz (2001) onde, segundo o autor, uma aliança estratégica “é um meio para desenvolver uma vantagem competitiva sustentável e assume um impacto organizacional de longo prazo; apresenta-se como uma forma de resposta às oportunidades e ameaças externas, sendo influenciada pelo seu contexto cultural e político; e afeta as decisões estratégicas e operacionais da cadeia de abastecimento, envolvendo os diferentes níveis hierárquicos e, direta ou indiretamente, todas as atividades da organização”. Nas cadeias de abastecimento aeronáuticas verifica-se a existência de vários tipos de alianças estratégicas, associadas aos diferentes níveis ocupados pelos fornecedores e às relações que estes estabelecem com o OEM. Desta forma, verificam-se desde alianças estratégicas menos próximas, nas camadas de fornecedores inferiores, como a subcontratação, a alianças profundas, entre os fabricantes e os fornecedores do nível 1, como a parceria de risco (Guerra, 2011).

De facto, os recentes modelos de cadeias de abastecimento têm sido implementados através de parcerias de risco e existem várias razões que levam o OEM a estabelecer este tipo de aliança estratégica, onde Figueiredo et al. (2008) destaca: a concentração em atividades relativas a competências *core*, com respetiva transferência de competências para os fornecedores do primeiro nível; necessidade de redução do tempo de desenvolvimento do avião; oportunidades de mercado provenientes da existência de parceiros em diferentes países; e dificuldade no financiamento associado ao desenvolvimento de um novo avião.

A elevada concorrência no mercado aeronáutico e a consciência dos custos inerentes ao desenvolvimento de um avião, associadas à pressão na redução dos preços e oferta de melhores produtos aos clientes finais, levaram os principais fabricantes de aviões a adotar parcerias de risco com os seus fornecedores de nível 1, com a esperança de redução de custos em toda a cadeia de abastecimento (Horng, 2007).

As parcerias de risco são caracterizadas pela envolvência dos fornecedores parceiros nas etapas iniciais de desenvolvimento de um novo modelo, onde estes assumem responsabilidade pela projeção e produção de sistemas fundamentais e complexos do avião (Bernstein, 2009). Desta forma, os fornecedores do primeiro nível partilham com o OEM, simultaneamente, os custos envolvidos (engenharia, infraestruturas, tecnologias, produção) e os riscos associados (risco financeiro, tecnológico, de mercado) (Junior, 2004).

Quanto maior for o peso de fornecedor parceiro na cadeia de abastecimento, maior o risco em que este incorre, pois assume um nível de responsabilidade superior (Johansen et al., 2005). O fabricante não assume qualquer garantia de compra mínima, sendo o mercado quem determina o lucro ou o prejuízo das diferentes partes envolvidas. No entanto, e na existência de benefícios, estes são proporcionalmente divididos relativamente aos investimentos realizados (Esposito, 2004).

De facto, os fornecedores de nível 1 têm vindo a assumir cada vez mais poder na cadeia de abastecimento aeronáutica por diversos motivos. Por um lado, os OEMs, que pretendem um maior controlo sobre a cadeia, têm revelado a tendência de racionalização dos seus fornecedores de primeiro nível (redução da base de fornecedores). Além disso, o OEM apresenta uma relação de parceria de extrema proximidade com os seus fornecedores de primeiro nível, onde são assinados compromissos de longo prazo e os fornecedores passam a assumir exclusividade no fornecimento dos sistemas principais correspondentes (Lima et al., 2005). Por outro lado, trocar de fornecedor pode tornar-se num processo muito dispendioso (Tan et al.,

2002), e a existência de fornecedores alternativos implica certificações adicionais (não só do fornecedor como dos componentes e, novamente, do próprio avião) que apresentam processos demorados e implicam novamente custos excessivos (Cizmeci, 2005). Verifica-se ainda a existência de barreiras à entrada (com fornecimento de produtos complexos, de elevado valor agregado e com elevados riscos associados) que conduzem, em alguns casos, a aquisições e fusões entre fornecedores do primeiro nível.

Todas as considerações supramencionadas refletem que o OEM transfere, não apenas, competências e riscos (Bales et al., 2004), mas também algum do seu poder para os seus parceiros de risco (Guerra, 2011).

A Globalização da Cadeia de Abastecimento Aeronáutica

A internacionalização da cadeia de abastecimento aeronáutica é considerada um tema tradicional da literatura (Esposito e Raffa, 2006). No entanto, o atual modelo integrador de sistemas, com parceiros de risco responsáveis pela produção de sistemas provenientes de qualquer parte do mundo, aumentou a relevância deste conceito (Niosi e Zhegu, 2005). O processo de internacionalização transformou desta forma a indústria aeronáutica numa cadeia de abastecimento mundialmente dispersa (Esposito, 2004).

De um modo geral, os principais fabricantes têm demonstrado preferência pelas alianças estratégicas internacionais, face aos contratos nacionais, estabelecidos no passado (MacPherson, 2004). Com esta tendência surge a abordagem de duas decisões fundamentais: *outsourcing* e *make-or-buy*.

Segundo Tang et al. (2009), a prática de *outsourcing* permite reduzir o tempo necessário de desenvolvimento e produção do avião, através da descentralização do processo produtivo com respetiva produção simultânea dos diferentes módulos pelos fornecedores, em diferentes partes do mundo. Permite ainda reduzir os custos de investimento, sendo aproveitado o *know-how* desses mesmos fornecedores.

De facto, a decisão da produção ou compra (*make-or-buy*), através de *outsourcing*, de um determinado componente ou sistema apresenta-se como uma decisão estratégica para o OEM de elevada importância, que assume várias vantagens, entre as quais se destacam (PwC, 2009):

- Especialização: especialização dos fornecedores de forma a reduzir custos e aumentar a qualidade;
- Crescimento acelerado: compra de capacidades em vez de desenvolvimento interno dessas mesmas capacidades permite reduzir o tempo de desenvolvimento de um avião;
- Custos de mão-de-obra inferiores: acesso a fornecedores que apresentam uma menor estrutura de custos de produção através de um valor de mão-de-obra reduzido.

Assim, os fabricantes consideram que as atividades relativas às competências *core* devem ser desenvolvidas internamente (*in house*) e que, em contrapartida, as atividades relacionadas com competências não *core* (como a produção de sistemas completos necessários para a montagem final) poderão ser obtidas através de *outsourcing*, permitindo o benefício das vantagens competitivas inerentes (Cizmeci, 2005).

Com o aumento da prática de *outsourcing*, a comunicação e a coordenação entre o OEM e os fornecedores tornam-se críticas na gestão de todo o desenvolvimento de um novo modelo, e a colaboração assume um papel fundamental. No entanto, importa perceber qual o impacto da globalização na cadeia de abastecimento bem como nos objetivos estratégicos de longo prazo do OEM e perceber os *tradeoffs* associados a esta tendência. Por um lado, torna-se relevante analisar se as vantagens obtidas com a redução de custos inerentes à transferência de atividades de produção compensam o aumento do risco associado ao desenvolvimento dessas mesmas atividades em determinados países (Horng, 2007). Além disso, é

importante analisar se a redução de custos associada à produção de um sistema principal num país cujo valor da mão-de-obra é reduzido, supera os custos de coordenação necessários para o transporte dos componentes e subsistemas até esse país (como por exemplo, transporte de componentes produzidos na Europa, necessários para a montagem do sistema final, na China) (Anderson, 2010).

Por outro lado, a globalização da cadeia de abastecimento aeronáutica desperta ainda uma outra preocupação, nomeadamente com os riscos associados à transferência de conhecimento aeronáutico para os países dos parceiros (Horng, 2007). Segundo Pritchard e MacPherson (2005), ao longo dos últimos anos, o aumento da participação dos produtores Japoneses na cadeia de abastecimento da Boeing, tem conferido especialização a estes fornecedores, nomeadamente através da produção e montagem da asa (considerada uma das partes mais complexas do avião e intensa em tecnologia). Neste momento, e com algum apoio por parte do governo, as empresas japonesas possuem capacidades específicas que lhes permitem entrar na indústria enquanto OEM (Lam, 2005). Desta forma, torna-se possível evidenciar que a transferência total da produção de alguns sistemas poderá diminuir as barreiras de entrada na indústria aeronáutica, contribuindo para o aumento da concorrência no mercado global futuro.

2.4.2. A Resiliência nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas

Com a globalização e o aumento da complexidade, os principais OEMs e os seus fornecedores parceiros revelam cada vez mais consciência acerca de potenciais fatores que podem afetar e comprometer o desempenho e a qualidade no desenvolvimento e produção dos mais recentes programas de aviões (PwC, 2013). As cadeias de abastecimento aeronáuticas encontram-se, assim, atualmente mais vulneráveis que nunca (Ghadge et al., 2010), expostas a diferentes tipos de perturbações, riscos e disrupções (Christopher e Towill, 2000; Norrman et al., 2004). De forma a não perderem competitividade e reduzir o desempenho operacional e financeiro (Ji e Zhu, 2008), as cadeias de abastecimento aeronáuticas deverão aumentar a sua capacidade de reação perante perturbações imprevistas, superando a sua vulnerabilidade (Peck, 2005; Rice e Caniato, 2003), através do aumento da resiliência (Carvalho et al., 2012; Tang, 2006).

A resiliência da cadeia de abastecimento define-se como a capacidade do sistema em retornar rapidamente ao seu estado original ou a um novo, mais vantajoso, relativamente àquele em que a perturbação ocorreu (Christopher e Peck, 2004), e evitar a ocorrência de modos de falha, isto é, prevenir o deslocamento para estados indesejáveis onde os modos de falha poderiam ocorrer (Sheffi, 2005). Ponomarov e Holcomb (2009) acrescentam a esta definição a capacidade da cadeia de abastecimento em preparar-se para eventos inesperados, dar resposta às disrupções verificadas, e recuperar dessas perturbações, mantendo a continuidade das suas operações no nível desejado de ligação e controlo sobre a estrutura e respetivas funções (Cardoso et al., 2015).

De acordo com Carvalho e Cruz-Machado (2007), “uma grande parte da literatura existente relativa a estratégias para lidar com perturbações nas cadeias de abastecimento concentra-se na área da gestão de risco (Pickett, 2006), nomeadamente na avaliação de riscos e mitigação de riscos (Kleindorfer e Saad, 2005), uma vez que contribui para uma redução na perda, probabilidade, velocidade, frequência e exposição a eventos de risco (Kull, 2008)”. Tang (2006) classifica os riscos em duas categorias fundamentais, nomeadamente, riscos operacionais e de disrupção. Os riscos operacionais encontram-se relacionados com as incertezas inerentes à procura, à oferta e aos diferentes tipos de custos. Os riscos de disrupção surgem associados a desastres naturais, como terremotos, inundações, furacões e ataques terroristas.

Segundo Rice e Caniato (2003), a capacidade de recuperação de potenciais perturbações causadas por estes riscos poderá ser obtida através do desenvolvimento de redundância e flexibilidade. A redundância surge associada à capacidade adicional utilizada para substituir a perda de capacidade causada por uma perturbação, enquanto a flexibilidade, por outro lado, implica a reestruturação da capacidade existente.

Nos modelos de cadeias de abastecimento aeronáuticas tradicionais, o OEM apresentava-se como o centro da ação e todos os fornecedores tinham um papel definido. Atualmente, e com a tendência de adoção do modelo LSSI, os fornecedores assumem uma elevada importância e interagem mutuamente. Este novo modelo apresenta um elevado potencial e poderá tornar-se mais eficiente. No entanto, é também mais complexo, apresenta maior dificuldade de controlo e consequentemente, um risco elevado (Deloitte, 2009). Além disso, e apesar do OEM e muitos dos parceiros fornecedores do nível 1 estarem consciencializados para a importância do aumento da resiliência, os fornecedores dos níveis mais baixos tendem a apresentar menores capacidades para lidar com os riscos inerentes ao desenvolvimento dos mais recentes programas. Individualmente os fornecedores não conseguirão identificar muitos dos problemas emergentes da cadeia de abastecimento e não conseguirão dar resposta a potenciais perturbações, pelo que a colaboração entre todas as partes envolvidas assume um papel fundamental na melhoria dos processos atuais de gestão de risco e no consequente aumento de resiliência.

Práticas de Resiliência nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas

Apesar das cadeias de abastecimento de todos os fabricantes da indústria aeronáutica serem suscetíveis a eventos inesperados, uma mesma disrupção poderá causar diferentes impactos dependendo do nível de resiliência de cada uma dessas cadeias (Cardoso et al., 2015). De acordo com a literatura existente, e considerando as principais características das cadeias de abastecimento aeronáuticas enunciadas anteriormente, são identificadas algumas práticas de resiliência da cadeia de abastecimento aeronáutica:

- **Redução do *lead-time* e a localização de instalações:** a proximidade entre instalações permite aumentar a eficiência da cadeia de abastecimento, na medida que o transporte, o tempo de espera e o *lead-time* podem ser reduzidos, possibilitando a melhoria do tempo de resposta a perturbações e o aumento da resiliência (Christopher e Rutherford, 2004);
- **Stock estratégico:** a garantia *stock* estratégico apresenta-se como uma prática de resiliência relacionada com a existência de *buffers* (tampões) de material ao longo da cadeia de abastecimento, projetados para alimentar os vários fluxos de materiais na ocorrência de perturbações (Iakovou et al., 2007; Tang, 2006);
- **Base de fornecedores flexível e fornecimento flexível:** a adoção de uma base de fornecedores flexível e de um fornecimento flexível diminui o risco de interrupções de produção, pelo que a existência de vários fornecedores do mesmo componente ou processo na cadeia de abastecimento aumenta a flexibilidade e, assim,, a resiliência (Tang, 2006);
- **Transporte flexível:** a existência de vários modos de transporte torna a cadeia de abastecimento menos dependente, aumenta a sua flexibilidade e a sua resiliência (Tang, 2006);
- **Colaboração e visibilidade na cadeia de abastecimento:** estas duas práticas de resiliência suportam a mitigação do risco e ajudam a antecipar e evitar perturbações na oferta e na procura (Iakovou et al., 2007; Christopher e Rutherford, 2004).

A adoção deste tipo de práticas apresenta alguns desafios, nomeadamente ao nível dos *tradeoffs* inerentes ao projeto, planeamento e operacionalidade da cadeia de abastecimento aeronáutica. Desta forma, torna-se relevante analisar o balanceamento correto entre a complexidade de aquisição das competências e capacidades necessárias para lidar com as principais disrupções e os níveis pretendidos de resiliência.

2.4.3. A Sustentabilidade nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas

De acordo com Brundtland (1987), o desenvolvimento sustentável apresenta-se como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas”. De facto, e à medida que o tempo evolui, este conceito tem ganho cada vez mais importância (Mota et al., 2015) dada a crise da escassez mundial de recursos e o declínio acentuado do bem-estar social. As mudanças climáticas, a escassez de recursos e os problemas de saúde humana caminham para uma situação de difícil retorno (Carvalho et al., 2013) e têm consciencializado as diferentes indústrias para a reestruturação dos seus processos e funções de uma forma sustentável (Willard, 2002). Como tal, a sustentabilidade tem sido identificada na literatura como um dos principais *drivers* que afeta as cadeias de abastecimento (Barbosa-Póvoa, 2014).

Com a globalização das operações no setor aeronáutico torna-se fundamental que os fabricantes e os seus fornecedores trabalhem de forma colaborativa de forma a enfrentarem os desafios (e as oportunidades) desta tendência (Gopalakrishnan et al., 2012). Dada a competitividade atual, o sucesso das cadeias de abastecimento aeronáuticas passa não só pelo seu desempenho na obtenção de lucro, mas também pela forma como se preparam para proteger o ambiente, através da adoção de iniciativas de desenvolvimento, produção e distribuição sustentáveis (Markley e Davis, 2007).

De acordo com Norman e MacDonald (2004), “uma cadeia de abastecimento sustentável é aquela que se desenvolve através do reconhecimento dos aspetos sociais, económicos e ambientais das suas políticas e ações, e que cria benefícios financeiros e corresponde às expectativas de todos os *stakeholders* preocupando-se com efeitos prejudiciais dessas mesmas políticas e ações no ambiente”. Desta forma, considera-se que a sustentabilidade é suportada por três pilares fundamentais, nomeadamente o económico, o ambiental e o social, que constituem o conceito “*triple bottom line*” (TBL) (Elkington, 2004). Segundo Carter e Rogers (2008), a operacionalização e a eficácia da TBL residem numa abordagem de forma integrada, onde os benefícios económicos podem ser alcançados através da melhoria das ações e normas sociais e da preservação do ambiente. O equilíbrio e a ponderação destes três pilares fundamentais constituem, assim, um desafio, do nível estratégico ao operacional (Seuring, 2013), que poderá conduzir a um futuro sustentável nas cadeias de abastecimento aeronáuticas.

Os Drivers da Sustentabilidade nas Cadeias Aeronáuticas

De acordo com Gopalakrishnan et al. (2012), a sustentabilidade nas cadeias de abastecimento aeronáutica é conduzida e impulsionada por seis fatores (*drivers*) fundamentais, que podem variar de acordo com a dimensão, localização e número de entidades envolvidas na cadeia de abastecimento (Figura 10).



Figura 10 – Drivers da Sustentabilidade nas Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas (adaptado Gopalakrishnan et al., 2012).

- 1) **Legislações governamentais:** com o objetivo de controlar de forma eficaz a poluição e reduzir os estragos ambientais, os governos têm elaborado legislações que obrigam os fabricantes a reduzir o impacto ambiental das suas operações (Sathindrakumar, 2003). Estas legislações e tratados exigem relatórios extensivos de sustentabilidade, auditorias à poluição e controlo de emissões, forçando as organizações a desenvolver tecnologias eficientes de tratamento de desperdícios, otimizar o uso de recursos e a considerar aspetos sociais e éticos nas suas operações. Desta forma, o principal objetivo passa por incentivar os fabricantes e os seus fornecedores a integrarem os processos e as práticas sustentáveis nas suas competências *core* (Delbard, 2008).
- 2) **Pressão dos stakeholders:** “a sociedade está cada vez mais consciente e preocupada com a produção e distribuição ambientalmente e socialmente sustentáveis” (Drumwright, 1994). Como tal, verifica-se um aumento da pressão dos diferentes *stakeholders*, que tem motivado os fabricantes a introduzirem novas práticas relacionadas de sustentabilidade (Sharma e Vredenburg, 1998; Trowbridge, 2001).
- 3) **Escassez de recursos:** dada a escassez de recursos esperada no futuro e a luta pela sua obtenção entre as diferentes cadeias de abastecimento, surge a necessidade de implementar medidas proativas que preservem esses recursos para as gerações futuras (Gopalakrishnan et al., 2012). Medidas que visem a eficiência energética, a reciclagem de resíduos, o uso consciente de recursos e matérias-primas e a criação de padrões de cultura no trabalho e a melhoria das normas de segurança permitirão uma redução de custos, e funcionarão como fatores fundamentais para a sustentabilidade (Hodges, 2009).
- 4) **Economia de baixo carbono:** uma economia de baixo carbono é uma economia que apresenta reduzidas emissões de carbono *per capita*. De facto, as emissões de carbono emitidas pelo ser humano, organizações e cadeias de abastecimento, têm sido identificadas como uma das principais causas de alterações climáticas e aquecimento global (Plambeck, 2012). Com o crescimento da população mundial espera-se que este problema seja acentuado e, como tal, a adoção de medidas sustentáveis que reduzam a emissão de carbono nas cadeias de abastecimento é fundamental.
- 5) **Normas ambientais:** ao seguirem as normas ambientais estabelecidas, os fabricantes conseguirão reduzir os impactos ambientais dos seus sistemas, melhorar a conformidade com os padrões ambientais e melhorar a qualidade dos produtos desenvolvidos (Hansen et al., 2004). Como um

dos exemplos é apresentada norma ISO 14001, introduzida em 1996 pela *International Organisation for Standardization*, com o objetivo de ajudar as organizações a mitigarem os riscos resultantes dos impactos ambientais das suas ações e, assim,, encorajar as cadeias de abastecimento a desenvolverem e melhorarem as suas próprias práticas sustentáveis (Kitazawa e Sarkis, 2000). Estas normas têm sido seguidas pelos principais fabricantes da indústria aeronáutica e “recomendam a partilha de informação e a comunicação aberta entre parceiros, de forma a padronizar os processos de forma sustentável”. Assim, acredita-se que a existência de alianças estratégicas com fornecedores e auditorias ambientais a esses fornecedores promove o sucesso ambiental (Curkovic e Sroufe, 2010).

- 6) **Responsabilidade social:** a dimensão social da TBL tem sido de certa forma a mais negligenciada dos três pilares da sustentabilidade ao longo dos últimos anos (Seuring et al., 2008). No entanto, têm sido também definidas (e adotadas pelos fabricantes) normas sociais (como a ISO 26000 e a SA 8000) que pretendem garantir condições de trabalho viáveis, políticas de comércio justo e justiça para a sociedade (Hutchins e Sutherland, 2008). Atualmente, considera-se que a formação, o desenvolvimento e o equilíbrio entre a vida profissional e a vida pessoal ajudam a encorajar os funcionários a aceitarem novas mudanças, a serem mais produtivos e a melhorar a cultura da empresa (Whooley, 2004). Como tal, considera-se a responsabilidade social, e em particular a satisfação dos funcionários, como um fator chave da sustentabilidade.

Os Desafios da Sustentabilidade nas Cadeias Aeronáuticas

Atualmente, e apesar dos desenvolvimentos verificados ao longo dos últimos anos, considera-se que a sustentabilidade nas cadeias de abastecimento dos principais fabricantes da indústria aeronáutica está ainda numa fase preliminar face ao seu potencial. Os OEM têm em consideração os aspetos fundamentais do bem-estar social, da preocupação ambiental e dos ganhos financeiros envolvidos e estão consciencializados para a abordagem desta tendência. Com base no estudo de Gopalakrishnan et al. (2012) aplicado à fabricante *British Aerospace Systems*, torna-se possível identificar e extrapolar alguns dos desafios atuais enfrentados nas principais cadeias de abastecimento aeronáuticas:

- Dificuldade em garantir a produção ou aquisição de produtos e serviços dentro do orçamento e simultaneamente a utilização de “processos amigos do ambiente”;
- Insuficiência e não-obrigatoriedade de cumprimento de legislação governamental leva a sustentabilidade a ser encarada como uma preocupação secundária, essencialmente para os fornecedores dos níveis mais baixos das cadeias de abastecimento aeronáuticas;
- A introdução de uma cultura orientada para a TBL em toda a cadeia de abastecimento apresenta uma elevada complexidade e os resultados de sustentabilidade apresentados refletem muitas das vezes apenas as iniciativas internas dos fabricantes, que sentem dificuldade na exigência dos mesmos padrões aos seus fornecedores;
- A procura de módulos ou peças de elevada qualidade, com tecnologia avançada e custos inferiores, leva os fabricantes a escolher fornecedores de todo o mundo e conduz a um incremento na complexidade de supervisão sobre as práticas de sustentabilidade por estes praticadas.

A sustentabilidade é, assim, apresentada enquanto um processo de longo prazo. No futuro, espera-se que estes desafios possam ser colmatados pelos principais fabricantes através de uma aprendizagem contínua

e da envolvimento de toda a cadeia de abastecimento nesta cultura de sustentabilidade, que incentive todos os parceiros e fornecedores a definirem e adotarem padrões sociais, ambientais e económicos orientados para a sustentabilidade (Gopalakrishnan et al., 2012).

2.5. O Desenvolvimento de novos materiais compósitos na Indústria

Aeronáutica

O desenvolvimento de novos produtos (NPD) numa indústria complexa e competitiva como a indústria aeroespacial, e onde se identificam desafios de colaboração, resiliência e sustentabilidade, apresenta-se como uma estratégia eficaz para obtenção de vantagens competitivas (De Brentani et al., 2010; Kazerouni et al., 2011). De facto, a necessidade de inovação associada à introdução de novos materiais na cadeia de abastecimento aeronáutica assume uma relevância fulcral e é identificada como um dos principais fatores para o sucesso sustentado (Calantone et al., 2006), com impacto significativo nos custos, na qualidade e na obtenção de vantagens competitivas (Avlonitis et al., 2001).

De acordo com McAdam et al. (2008), o NPD encontra-se atualmente focado na busca de soluções que permitam alcançar uma redução nos custos operacionais e de serviço, bem como nas emissões e no peso dos aviões, e que, simultaneamente, aumentem os parâmetros de desempenho operacional.

Ao longo dos últimos anos, os principais OEMs têm sido pressionados para a melhoria da eficiência dos aviões produzidos, devido ao elevado crescimento da indústria aeronáutica, ao aumento dos custos do combustível e às preocupações ambientais (Williamson e Padmapriya, 2003). De acordo com Witik et al. (2012), apesar de diversos melhoramentos na aerodinâmica e no desempenho do motor revelarem alguns progressos, ganhos superiores e significativos podem ser obtidos através da produção de aviões mais leves. A redução no peso dos aviões aumenta a eficiência do combustível utilizado, reduzindo as emissões e os custos operacionais. Neste sentido, a indústria aeronáutica tem procurado materiais alternativos às ligas metálicas tradicionalmente utilizadas, tendo-se focado nas últimas décadas na utilização de materiais compósitos.

Inicialmente os materiais compósitos eram utilizados apenas em estruturas secundárias, como carenagens, painéis de chão e interiores. Com o aumento do conhecimento e do desenvolvimento destes materiais, tem-se verificado uma vasta utilização de compósitos também em estruturas primárias, nomeadamente em todos os componentes da asa e do estabilizador, bem como na armação e superfícies exteriores da fuselagem (Andersson et al., 2014).

Atualmente, os materiais compósitos encontram-se na vanguarda da evolução dos materiais utilizados na indústria aeronáutica, da inovação e do NPD, estando cada vez mais presentes na estrutura dos aviões através de uma vasta gama de aplicações (Chouvion et al., 2011). A cada geração de aviões desenvolvida verifica-se uma tendência no aumento da utilização de materiais compósitos e uma respetiva redução das principais ligas metálicas utilizadas, nomeadamente, de alumínio, titânio e aço. Neste contexto, destacam-se os modelos Boeing 787 e o Airbus A350 XWM, onde os materiais compósitos representam 50% e 53% dos materiais utilizados respetivamente, permitindo uma redução de aproximadamente 20% quer no peso global do avião, quer no consumo de combustível por passageiro (Airbus, 2009; Boeing, 2017).

Segundo Taylor (2000), Marsden et al. (2011) e Mrazova (2013), a utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica possibilita a obtenção de várias vantagens, tais como:

- Potencial redução de peso, devido a uma maior resistência e rigidez específica;
- Maior flexibilidade de *design*, com a capacidade de fabrico em direções específicas;
- Maior resistência à corrosão e à fadiga;
- Superfícies dos aviões tornam-se mais aerodinâmicas devido ao número reduzido de fixadores em estruturas compostas (comparativamente às estruturas de alumínio com utilização de rebites);
- Elevada estabilidade térmica (permitindo que os materiais não contraíam nem expandam excessivamente perante variações de temperatura).

No entanto, os mesmos autores apontam também algumas desvantagens à utilização deste tipo de materiais:

- Estrutura laminada com interfaces fracas;
- Suscetibilidade a impactos que provoquem danos internos não visíveis;
- Existência de possíveis defeitos de fabrico e variabilidade nas propriedades dos materiais;
- Necessidade de isolamento para prevenção de contacto com estruturas de alumínio adjacentes e respetiva corrosão galvânica.

A adicionar aos pontos supramencionados, acresce ainda o elevado custo de obtenção das matérias-primas, processos intensivos em energia e a necessidade de equipamentos de produção dispendiosos (Kihlman, 2005). Neste sentido, e de forma a continuar a tirar partido das vantagens associadas a estes materiais, os principais fabricantes da indústria aeronáutica procuram atualmente desenvolver novos materiais compósitos bem como novos processos de produção, integrando-os nas suas cadeias de abastecimentos de forma a otimizá-las e torná-las mais sustentáveis.

2.6. Conclusões do Capítulo

As especificidades da indústria aeronáutica enquanto setor de elevada tecnologia, bem como a forte rivalidade verificada entre empresas, os elevados custos de desenvolvimento, os longos tempos de espera e os riscos inerentes aos projetos têm aumentado a complexidade das cadeias de abastecimento das empresas produtoras de aviões, conduzido a sua reorganização e liderado a sua evolução ao longo dos tempos. Com o aumento da globalização e o crescimento de parcerias de risco estratégicas, os principais fabricantes têm transferido responsabilidades e poder sobre o desenvolvimento de aviões para os seus fornecedores, e os seus recentes programas revelam a tendência de um modelo integrador de sistemas.

No entanto, a maioria dos OEMs assume ainda atualmente algumas responsabilidades na projeção e produção de alguns componentes, pelo que a transição para este modelo deverá ser considerada como um processo evolutivo. Esta transição apresenta dificuldades, exigências, oportunidades e desafios ao nível da gestão da cadeia de abastecimento e compete aos fabricantes decidir estrategicamente qual o posicionamento ideal pretendido para o futuro.

Os principais desafios experienciados pelas cadeias de abastecimento aeronáuticas, identificados no presente capítulo, encontram-se resumidos na Figura 11 e revelam a necessidade de atuação em três categorias fundamentais: a colaboração, a resiliência e a sustentabilidade.

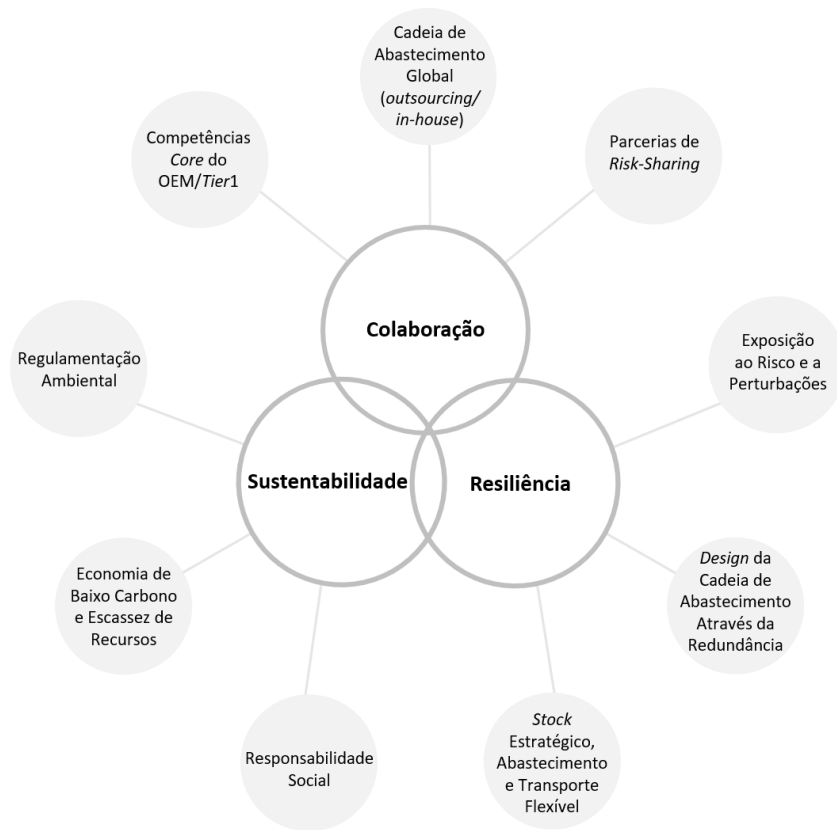


Figura 11 - Principais desafios da Cadeia de Abastecimento Aeronáutica

Neste contexto, destaca-se ainda o NPD, com recentes e crescentes tendências no desenvolvimento de novos materiais compósitos associados a novas tecnologias de fabrico e respetiva introdução nas cadeias de abastecimento aeronáuticas, onde se refletem muitos dos desafios identificados. Os principais fabricantes de aviões encontram-se focados na busca de estratégias eficazes de NPD, que permitam a otimização das suas cadeias de abastecimento tornando-as mais sustentáveis e que conduzam à obtenção de vantagens competitivas no longo prazo. De facto, a competitividade do OEM encontra-se cada vez mais dependente da sua capacidade em gerir de forma eficaz e eficiente toda a sua cadeia de abastecimento de forma integrada. Neste sentido, os desafios reconhecidos remetem para a necessidade de desenvolvimento de modelos quantitativos de suporte e apoio à decisão, que auxiliem na definição das características de projeto e nas decisões de planeamento da cadeia de abastecimento associadas ao desenvolvimento de novos produtos, através da colaboração entre entidades, construindo resiliência e sustentabilidade (Brandeburgh et al, 2014).

3. Estudo de Caso: A Embraer

No presente capítulo pretende-se caracterizar o problema em análise. Desta forma, é introduzido o estudo de caso, organizado em seis secções. Na secção 3.1 é apresentada a Embraer, enquanto um dos principais fabricantes do setor aeronáutico e a produzir em Portugal. De seguida, surge uma breve contextualização histórica da empresa, na secção 3.2, e na secção 3.3 são identificadas as suas principais localizações globais. Na secção 3.4 é analisada a cadeia de abastecimento da Embraer com base na evolução do seu portefólio de aviões comerciais e no seu cenário competitivo atual. Na secção 3.5 é caracterizado o problema abordado na dissertação. A secção 3.6 resume as principais conclusões do capítulo.

3.1. A Embraer S.A.

Fundada em 1969, no Brasil, a Embraer S.A. apresenta-se atualmente como a terceira maior fabricante de aviões comerciais do mundo. Atua em quatro áreas fundamentais, nomeadamente, aviação comercial, aviação executiva, aviação agrícola e defesa e segurança, desempenhando as etapas de projeto, desenvolvimento, fabrico e comercialização de sistemas e aeronaves, bem como suporte e serviços de pós-venda (Embraer, 2015).

A visão e missão definidas pela empresa remetem para a consolidação da posição global assumida na indústria aeronáutica e para o fortalecimento da liderança nos seus segmentos de atuação, onde é reconhecida pelos níveis de excelência e pelo valor criado para os seus clientes. De acordo com as mais recentes estatísticas, a Embraer identifica-se como líder no mercado de aviões comerciais na categoria até 130 assentos, quinta maior fabricante de aviões executivos no mundo e maior empresa de soluções de defesa e segurança no Brasil (Embraer, 2015).

Desde a sua origem, a Embraer entregou mais de 8000 aeronaves. Atualmente, 1600 aviões comerciais da Embraer, distribuídos por mais de 100 companhias aéreas em 70 países diferentes, transportam anualmente mais de 145 milhões de passageiros (Embraer, 2016).

3.2. História da Embraer

A origem da Embraer, Empresa Brasileira de Aeronáutica, remonta a 1964, numa iniciativa estratégica do governo brasileiro para implementar a indústria aeronáutica no país. Enquanto empresa pública, o objetivo inicial da Embraer passaria pela montagem local de aeronaves, projetadas por engenheiros e técnicos brasileiros. Desta forma, a empresa concentraria os seus esforços na aquisição de autonomia tecnológica, isto é, “na capacidade de compreensão de todo o ciclo tecnológico de desenvolvimento de aviões, desde a etapa inicial de projeto à conceção, fabrico e comercialização final” (Cassiolato et al., 2002).

O primeiro avião produzido pela Embraer foi o EMB 110 Bandeirante, um avião de baixo custo operacional para uso civil e militar (utilizado no transporte de cargas e passageiros), destinado à ligação de regiões remotas e com fracas infraestruturas (Embraer, 2016). Seguiram-se os modelos EMB 200 Ipanema para a aviação agrícola, o planador EMB 400 Urupema e o jato de treino avançado e ataque, EMB 326 Xavante. As décadas de 1970 e 1980 foram caracterizadas pelo aumento do portefólio de produtos da empresa, com a produção de outros aviões, alguns dos quais desenvolvidos através de parcerias que se afirmaram ao longo do tempo e que permitiram a transferência de conhecimento e tecnologia.

No entanto, o final dos anos 80 e o início dos anos 90 marcaram um período difícil da história da empresa. A Embraer encontrava-se a desenvolver conjuntamente com a *Fábrica Argentina Militar de Aviones (FAMA)*, na Argentina, o programa de aviões CBA-123. Com a partilha de atividades e a integração das equipas técnicas, os custos de desenvolvimento do projeto excederam as previsões e obrigaram a reajustes no preço final. Consequentemente, o avião foi rejeitado pelo mercado, nenhuma das intenções de compra foi concretizada e a Embraer obteve elevados prejuízos (Goldstein, 2002). Com a intensa crise económica verificada na altura, a Embraer viu-se obrigada a recorrer a empréstimos bancários com juros elevados para financiar os seus próprios negócios e, quase em falência, acabou por ser privatizada em 1994 (Bastos, 2006). Com a privatização da empresa, verificou-se uma profunda reestruturação organizacional, com o objetivo de adotar um modelo empresarial eficiente, competitivo e de qualidade, orientado para o êxito à escala global. O foco estratégico passou a ser o segmento de aviões regionais, e o projeto ERJ-145 (interrompido durante a transição para o setor privado) foi retomado e acelerado, através de parcerias de risco com fornecedores (que ajudaram no financiamento do desenvolvimento) (Oliveira, 2005). Neste projeto, a Embraer conseguiu refletir as tendências de mercado, que revelavam o aumento do tamanho das aeronaves e a utilização de propulsão a jato. A comercialização destes aviões foi um êxito e permitiu à Embraer recuperar rapidamente e estabelecer bases sólidas para o futuro da empresa. Desde então, a Embraer tem desenvolvido novas soluções nas suas quatro áreas de negócio (i.e., aviação comercial, executiva, agrícola e defesa e segurança) através da expansão global das suas localizações e da sua cadeia de abastecimento, consolidando a sua presença enquanto uma das maiores empresas da indústria aeronáutica.

3.3. A Embraer no mundo

Sediada em São José dos Campos, no Brasil, a Embraer assume atualmente uma presença global, com as principais instalações localizadas na América, Ásia e Europa (Figura 12).

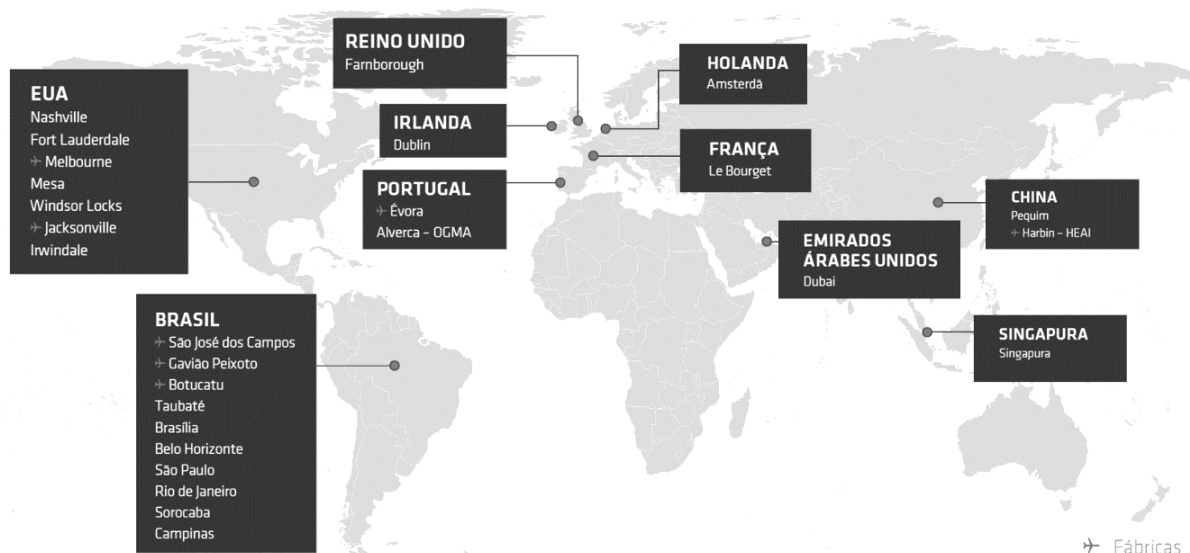


Figura 12 - Presença global da Embraer (adaptado de Embraer, 2015)

As principais fábricas situam-se em São José dos Campos (duas unidades industriais e uma unidade subsidiária - Eleb - que produz sistemas de trem de aterragem e componentes hidráulicos e mecânicos), Gavião Peixoto, Botucatu, Melbourne (primeira unidade nos Estados Unidos que realiza a montagem final

de aviões executivos), Jacksonville, Harbin - HEAI, e Évora (onde duas unidades dedicadas ao fabrico de estruturas metálicas e materiais compósitos assumem especial relevância no desenvolvimento e produção das asas dos mais recentes modelos de aviões comerciais). A empresa possui também Centros de Engenharia em Belo Horizonte, Flórida e em Évora (inaugurado em 2015). Os principais Centros Logísticos localizam-se em Taubaté e Campinas, e os Centros de Serviços de Manutenção em Sorocaba, Nashville, Windor Locks, Singapura e Alverca - OGMA. A Embraer apresenta ainda unidades industriais e escritórios no Brasil, França, Reino Unido, Irlanda, Portugal, Holanda e Emirados Árabes Unidos (Embraer, 2015).

De facto, a estrutura global da Embraer apresenta-se como o resultado de um conjunto de decisões estratégicas que visam reunir as melhores condições tecnológicas e financeiras bem como todos os recursos de produção, vendas e serviços, fundamentais para o desenvolvimento dos seus negócios. Atualmente, as operações do grupo são asseguradas por mais de 18000 profissionais, de 20 nacionalidades diferentes, que sustentam o cenário competitivo da aviação comercial através de uma resposta eficiente às exigências do mercado, e permitem sustentar a posição de liderança alcançada pela Embraer (Embraer, 2017).

3.4. Cadeia de Abastecimento da Embraer

Os diferentes modelos de aviões comerciais desenvolvidos pela Embraer ao longo do tempo refletem as características da evolução das cadeias de abastecimento aeronáuticas enunciadas na secção 2.2:

- Na década de 1980, o modelo *EMB 120 Brasília* (30 assentos) foi produzido na sua totalidade nas instalações da Embraer. A fase de projeto foi desenvolvida fisicamente, de forma não eletrónica, e a produção envolveu os conceitos tradicionais de fabrico, com respetiva montagem final em linha. A cadeia de abastecimento caracterizou-se pelo elevado nível de verticalização, sustentada por cerca de 500 fornecedores (Oliveira, 2005);
- A década de 1990, marcada pelo desenvolvimento da família *ERJ-145* (37 a 50 assentos), permitiu que a Embraer atingisse um novo patamar tecnológico. O projeto dos novos modelos foi desenvolvido de forma eletrónica e o fabrico em linha incorporou os conceitos de produção *lean*. Verificou-se o *outsourcing* de processos, a racionalização de fornecedores (redução para 350) e o estabelecimento de parcerias de risco com fornecedores específicos que assumiram conjuntamente os riscos, os custos e os benefícios deste desenvolvimento (Cassiolo et al., 2002);
- A procura do mercado por aviões de capacidade média, levou a Embraer a entrar no segmento de mercado de 70 a 130 assentos. Com a chegada da década de 2000, iniciou-se, assim, o desenvolvimento da família *E-Jets* - complexa, sofisticada e inovadora ao nível da engenharia, gestão e relação com fornecedores. A fase de projeto passou a ser desenvolvida de forma digital, através da simulação de processos e do co-desenvolvimento com os parceiros. A racionalização de fornecedores revelou-se ainda mais intensa e aumentou o número de parcerias de risco. A Embraer passou a liderar a cadeia de abastecimento através da montagem final com a respetiva integração de sistemas (Oliveira, 2005; Embraer, 2014).

De facto, verifica-se que a vantagem competitiva adquirida pela Embraer ao longo do tempo reside na sua capacidade de inovação, identificação das necessidades do mercado e resposta às expectativas dos seus clientes. Com 1200 entregas, a família de aviões *E-Jets* tem sido reconhecida pelo mercado devido à sua flexibilidade de operação, baixo consumo de combustível, baixas emissões e custo operacional reduzido.

Atualmente, e desde 2013, a Embraer encontra-se focada no desenvolvimento do programa dos *E-jets E2*, a segunda geração da família de *E-jets*, composta por três novos modelos: *E-190 E2* (que chegará ao mercado em 2018), *E-195 E2* (com entrada em serviço em 2019) e *E-175 E2* (com entrada em serviço em 2020). Com este novo programa, “a Embraer pretende expandir a sua presença em diversos mercados e reforçar o seu compromisso de investimento na aviação comercial, de forma a manter a liderança de mercado no segmento de 70 a 130 assentos” (Embraer, 2017) (Figura 13).

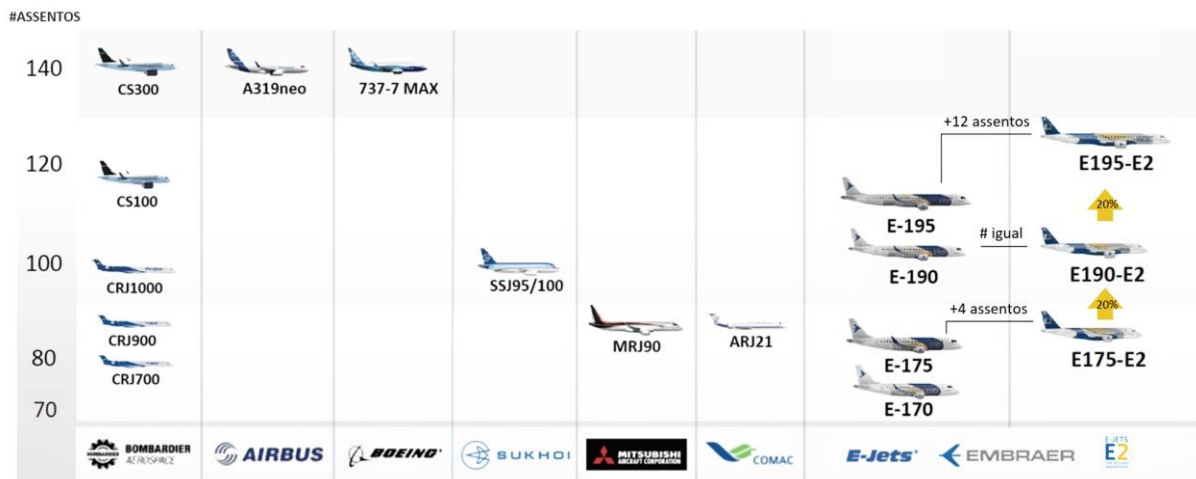


Figura 13 - Cenário competitivo atual da Embraer – Segmento de 70 a 130 assentos (adaptado de Embraer, 2015)

Ao longo dos últimos anos tem-se verificado um aumento da competitividade e concorrência no segmento de 70 a 130 assentos, com a introdução de novos modelos de vários fabricantes, como a Bombardier, a Comac, a Mitsubishi e a Sukhoi, aumentando a pressão existente no mercado.

A qualidade, a eficiência e a otimização atingem níveis superiores a cada novo programa desenvolvido e assumem-se como fatores fundamentais para o sucesso. Como tal, a Embraer pretende superar a concorrência, através do desenvolvimento da segunda geração da família dos E-jets, os E-jets E2. Comparativamente à geração anterior, os novos aviões “apresentarão novos motores de elevado desempenho, asas com melhor aerodinâmica, controles de voo *full fly-by-wire* e diversos sistemas aperfeiçoados, que possibilitarão um menor consumo de combustível, bem como uma redução do custo de manutenção, de emissões e de ruído externo” (Embraer, 2015). Estes modelos caracterizam-se ainda pelo aumento do conforto, espaço destinado aos passageiros e aumento do número de assentos - características valorizadas pelas companhias aéreas. No entanto, para atingir os objetivos a que se propõe no desenvolvimento deste novo programa, a Embraer enfrenta desafios acrescidos que se refletem particularmente no aumento da complexidade e da gestão da sua cadeia de abastecimento.

Conforme identificado na seção 2.3, a Embraer apresenta-se como um OEM que lidera a cadeia de abastecimento (*OEM Lead Supply Chain model*). Contudo, e de acordo com as estratégias adotadas no desenvolvimento do seu portefólio desde o início da sua história (enumeradas no início da presente secção), verifica-se uma tendência na racionalização do número de fornecedores de componentes e peças, e por outro lado, um acréscimo na procura global de parceiros, responsáveis pela conceção, produção e entrega de sistemas finais (característica do modelo integrador de sistemas – *LSSI*, adotada no desenvolvimento do Boeing 787 e do Airbus A380). Com a nova geração de E-jets, esta tendência torna-se ainda mais evidente, com a existência de fornecedores parceiros de nível 1 e alguns de nível 2 que assumem um papel

fundamental na cadeia de abastecimento. Na Figura 14 encontram-se representados os principais sistemas constituintes de um avião Embraer, bem como alguns dos principais parceiros envolvidos no fornecimento futuro desses sistemas para a montagem final do modelo E-190 E2. A informação presente na figura visa a representação da cadeia de abastecimento global do mais recente modelo da Embraer, tendo sido obtida através dos *websites* da Embraer e dos fornecedores identificados.

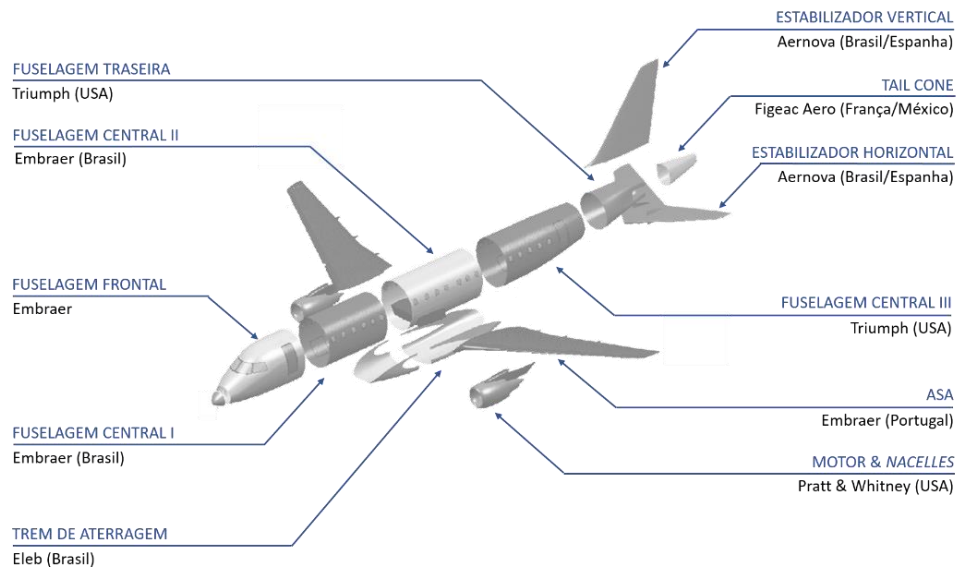


Figura 14 - Principais sistemas de um avião Embraer e exemplos de parceiros associados ao modelo E190-E2

De facto, o sucesso do desenvolvimento deste novo programa encontra-se fundamentalmente dependente da coordenação e da colaboração existente entre os diferentes fornecedores globais, parceiros e a Embraer enquanto OEM. Como tal, a Embraer encontra-se focada no aumento da visibilidade e na partilha de informação ao longo de toda a cadeia de abastecimento, de forma a garantir o acesso de todos os intervenientes às mais recentes informações de procura e a controlar a capacidade dos fornecedores em cumprir os prazos delineados para a entrega dos sistemas principais para a posterior montagem final (Tang e Zimmermen, 2009). A Embraer pretende reduzir custos, melhorar a produtividade e a qualidade e aumentar a rapidez e flexibilidade, otimizando a sua cadeia de abastecimento. Neste sentido, os objetivos da empresa visam a definição e implementação de estratégias de colaboração que possam ser perpetuadas em toda a cadeia de abastecimento e alinhadas com as mais recentes tendências das cadeias de abastecimento aeronáuticas, identificadas ao nível da sustentabilidade e da resiliência.

3.5. Caracterização do Problema

No contexto da competitividade de uma indústria cada vez mais global e desenvolvida, a liderança assenta em fatores diferenciadores valorizados pelo mercado que potenciem novas vantagens competitivas. O crescimento contínuo da indústria aeronáutica, o aumento das preocupações acerca dos efeitos futuros das emissões da aviação e os custos com combustível têm orientado os fabricantes para o desenvolvimento de novas soluções que permitam aumentar a eficiência dos aviões e reduzir os custos operacionais das companhias aéreas (Witik et al., 2012). Neste sentido, a introdução de novos materiais na estrutura do avião assume uma relevância fulcral e é identificada como um dos principais focos para o sucesso sustentado (Calantone et al., 2006; Talke et al., 2009). No entanto, a inovação de produtos com base em

novos materiais e nas suas tecnologias de processamento apresenta atualmente um período de desenvolvimento, implementação e comercialização na cadeia de abastecimento aeronáutica muito elevado (frequentemente de 10 a 20 anos), envolvendo riscos, incerteza e custos elevados (Deloitte, 2009; *National Science and Technology Council*, 2011). Como tal, torna-se necessário analisar a cadeia de abastecimento através de uma abordagem holística, onde aspetos de sustentabilidade devem ser considerados.

No entanto, e ao nível da literatura, verifica-se a ausência de trabalhos relacionados com o desenvolvimento de novos produtos, focados especificamente em materiais compósitos, que explorem de forma realista os objetivos das cadeias de abastecimento aeronáuticas e que considerem as principais decisões estratégicas e táticas de *design* e planeamento. Esta será a problemática estudada no presente trabalho e que reflete as principais preocupações da indústria Aeronáutica, em geral, e da Embraer, em particular. Pretendem-se quantificar e comparar as principais diferenças económicas e ambientais associadas à integração na cadeia de abastecimento aeronáutica de vários materiais compósitos e processos de produção, apresentando uma sistematização de dados e informações que permita alavancar o desenvolvimento de modelos analíticos de projeto e planeamento, enquanto ferramentas de apoio à tomada de decisão. A sistematização das principais tendências, características e dados que possibilitem introdução de potenciais materiais avançados na cadeia de abastecimento aeronáutica será desenvolvida com base no caso específico da Embraer e surge inserida no projeto internacional intitulado *Introduction of Advanced Materials Technologies Into New Product Development for the Mobility Industries* (IAMAT). Este projeto envolve a colaboração do Instituto Superior Técnico (IST), da Faculdade de Engenharia da Cidade do Porto, da Universidade do Minho e do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

Os materiais compósitos têm liderado a evolução dos materiais aeronáuticos e o desenvolvimento de novos produtos e processos ao longo das últimas duas décadas (Oliver Wyman, 2015; McAdam et al., 2008). No entanto, a utilização de compósitos apresenta vários desafios, nomeadamente ao nível dos custos de produção (onde atualmente se verifica a predominância do processamento em autoclave, com elevados consumos energéticos) e de transporte (com a existência de um número relativamente reduzido de fornecedores certificados a nível global, onde muitos dos materiais utilizados necessitam de ser transportados em condições de refrigeração). Neste sentido, o projeto IAMAT pretende explorar novos processos alternativos para a obtenção dos materiais compósitos atuais, que permitam uma redução dos custos associados e que apresentem um menor impacto ambiental. Este projeto visa, no longo prazo, a implementação de um novo processo na cadeia de abastecimento do modelo da Embraer E-195 E2, nomeadamente associado à produção das asas, fabricadas pela Embraer Portugal – Compósitos e Estruturas Metálicas.

3.6. Conclusões do Capítulo

A Embraer apresenta-se como a terceira maior fabricante de aviões do mundo, sendo líder no mercado de aviões comerciais na categoria até 130 assentos. Desde o período de privatização a empresa procura um modelo empresarial eficiente, competitivo e de qualidade, orientado para o sucesso à escala global. As características das cadeias de abastecimento dos modelos que desenvolveu ao longo do tempo revelam a sua posição enquanto OEM “líder da cadeia de abastecimento” (*OEM Lead Supply Chain Model*) e indicam uma tendência futura de aproximação ao modelo do integrador de sistemas (*LSSI Model*). Com o desenvolvimento do novo programa de E-Jets E2, a Embraer pretende reduzir custos, melhorar a produtividade e a qualidade e aumentar a rapidez e flexibilidade, otimizando a sua cadeia de abastecimento de forma a manter a posição de liderança e competitividade no setor. Neste sentido, surge a necessidade de inovação associada à introdução de novos materiais compósitos e respetivas tecnologias de fabrico na sua cadeia de abastecimento. Esta será a problemática estudada no presente trabalho, através da sistematização das principais informações envolvidas e necessárias para promover e alavancar o desenvolvimento de modelos analíticos de *network planning*, focados no desenvolvimento de novos materiais compósitos e que englobem uma abordagem holística, onde aspetos de sustentabilidade sejam considerados.

4. A Otimização do Projeto e Planeamento de Cadeias de Abastecimento Aeronáuticas

As principais características das cadeias de abastecimento aeronáuticas (identificadas no Capítulo 2) e a complexidade inerente à obtenção de vantagens competitivas dos principais fabricantes de aviões (abordada no Capítulo 3 com o caso particular da Embraer), remetem para a importância da tomada de decisões estratégicas sustentadas em modelos quantitativos de suporte à decisão, que englobem as principais questões associadas à introdução de novos materiais compósitos e tecnologias de fabrico na cadeia de abastecimento. Desta forma, o presente capítulo tem como objetivo explorar modelos relevantes na literatura - através das respetivas abordagens a decisões estratégicas e táticas envolvidas, bem como as principais métricas consideradas - que apresentem formulações genéricas adaptáveis à representação das características do problema identificado. O capítulo surge organizado em três secções. Na secção 4.1 surge uma breve introdução geral ao projeto e planeamento de cadeias de abastecimento aeronáuticas, com especial foco na etapa de network design associada ao desenvolvimento de novos produtos. Na secção 4.2 são analisados modelos matemáticos de otimização de cadeias de abastecimento, através de uma revisão da literatura dos artigos mais relevantes. As técnicas e métricas utilizadas são investigadas, de forma a identificar os principais aspetos que deverão ser estudados, explorados e incluídos no contexto do desenvolvimento de novos produtos compósitos, de forma a potenciar o desenvolvimento futuro destas ferramentas analíticas de apoio à decisão. A secção 4.3 resume as principais conclusões do capítulo.

4.1. Projeto e Planeamento de Cadeias de Abastecimento

A evolução e o aumento da complexidade das cadeias de abastecimento aeronáuticas ao longo do tempo tem conduzido à necessidade de desenvolvimento de novos métodos de otimização e de análise, que permitam relacionar e integrar o projeto (*design*) do avião com o projeto (*design*) da cadeia de abastecimento (Tang et al., 2013).

O projeto da cadeia de abastecimento (*network design*), realizado durante a fase inicial do planeamento, é considerado um dos elementos fundamentais da competitividade dos fabricantes aeronáuticos, permitindo a admissibilidade técnica e viabilidade económica das estratégias de longo prazo de introdução de novos materiais, processos ou programas completos de aviões. Atualmente, o período de desenvolvimento desses materiais ou processos para implementação e comercialização na cadeia de abastecimento aeronáutica é muito elevado (podendo chegar a 20 anos) (*National Science and Technology Council*, 2011), e a inovação de produtos com base em novos materiais e nas suas tecnologias de processamento assume elevado risco e incerteza (Braziotisa et al., 2017). Desta forma, o *design* e o planeamento da cadeia de abastecimento assumem cada vez mais desafios, implicando a configuração de uma rede com vários períodos, múltiplos cenários, diferentes países e vários níveis da cadeia de abastecimento (Goetschalckx e Fleischmann, 2005). O projeto da cadeia de abastecimento envolve três níveis fundamentais: estratégico, tático e operacional (Manzini et al., 2008), sendo que na etapa de projeto da rede da cadeia de abastecimento (*supply chain network design*, SCND) predominam decisões estratégicas e táticas, com um horizonte temporal de longo e médio prazo e de elevada influência no desempenho da cadeia de abastecimento (Chopra and Meindl, 2012). De forma a obter um sistema global integrado, as decisões estratégicas deverão considerar

simultaneamente as preocupações táticas (Salema, Barbosa-Póvoa e Novais, 2010), incorporando aspetos como o número e a localização de infraestruturas, seleção de fornecedores de *sub-assemblies*, componente e materiais, decisões de capacidade e fornecimento, fluxo de produtos entre diferentes localizações, rede de transportes, definição dos níveis de compra e planeamento de inventário (Govindan et al., 2015).

Tendo como objetivo o projeto de cadeias de abastecimento otimizadas e eficientes com o nível de desempenho desejado, que incluam as decisões identificadas, torna-se relevante o desenvolvimento de modelos para o apoio à decisão em SCND (Shah, 2005). Modelos de otimização matemáticos com programação inteira mista têm sido uma escolha recorrente na literatura e revelam-se adequados para a avaliação do desempenho da cadeia de abastecimento perante condições de incerteza em que se pretenda encontrar uma solução ótima (Corominas et al., 2015; Barbosa-Póvoa, 2014).

4.2. Modelação de Projeto e Planeamento de Cadeias de Abastecimento

Ao longo dos últimos anos, muitos artigos têm sido publicados no âmbito da modelação genérica de cadeias de abastecimento. No entanto, verifica-se a quase inexistência de literatura focada especificamente na modelação de cadeias de abastecimento aeronáuticas, bem como investigação relativa ao planeamento estratégico e tático característicos das fases de SCND de novos programas, e da introdução de novos materiais e processos (Tang et al., 2013). Ainda assim, muitas das definições e métodos comuns utilizados no projeto genérico de cadeias de abastecimento podem ser aplicados neste contexto.

Na indústria aeroespacial, o projeto dos diferentes sistemas do avião e os custos de produção associados revelam-se prioritários. Neste sentido, destaca-se o trabalho de Tang et al. (2013), um modelo de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming*, MILP) focado na produção da *wing box* de um avião, que envolve decisões estratégicas e táticas relacionadas com fornecedores externos, localizações de produção e clientes em regiões fixas. O modelo desenvolvido visa a minimização do custo total atualizado da rede (*total time-discounted network cost*) através da especificação da capacidade e localização das instalações de produção, fluxo de materiais e rotas de transporte dentro da rede.

De facto, os modelos matemáticos de projeto da rede têm sido, tradicionalmente, baseados em objetivos económicos como a minimização dos custos ou a maximização do lucro (Ilgin e Gupta, 2010; Pinto-Varela et al., 2011). A maioria desses modelos caracteriza-se por apresentar um objetivo único (Eskandarpour et al., 2015). Autores como Pishvae et al. (2010a) e Pishvae et al. (2010b) apresentam exemplos deste tipo de modelos - modelos MILP com foco na produção e nos fluxos de materiais entre as diferentes entidades através de uma só função objetivo orientada para o desempenho económico da cadeia de abastecimento. No entanto, e à medida que aumentam as preocupações ambientais, novos objetivos e restrições começam a emergir ao nível académico e industrial, integrando os modelos desenvolvidos, enquanto fatores fundamentais no contexto das cadeias de abastecimento e no processo de decisão (Pinto-Varela et al., 2011). Conforme representado no estudo de caso de You e Wang (2011), verifica-se que as soluções ótimas obtidas a partir de modelos puramente económicos, modelos ambientais ou modelos intermédios podem conduzir a resultados distintos. Também nas cadeias aeronáuticas, como já foi referido, a preocupação da sustentabilidade é um aspeto a ter em conta. Todavia não foi identificado nenhum trabalho que aborde esta problemática.

Na literatura identificam-se diversos modelos de SCND que utilizam formas distintas de incorporação de preocupações ambientais. A forma mais tradicional surge através da expressão de uma única função objetivo como uma média ponderada de todos os objetivos. Autores como Krikke (2011) e Kannan et al. (2012) apresentam nos seus modelos a conversão dos impactos ambientais (como por exemplo emissão de gases com efeito de estufa) em unidades monetárias equivalentes, através da utilização de fatores de conversão e posterior agregação com os objetivos económicos, numa única função objetivo. Paksoy et al. (2012) considera os custos das emissões e a maximização do lucro obtido a partir da reciclagem na função de objetivo económica. Outros autores, como Papapostolou et al. (2011), Lira-Barragán et al. (2011) e Liu et al. (2011) apresentam uma outra abordagem e consideram a função económica enquanto principal objetivo, representando a dimensão ambiental enquanto restrições dos seus modelos. Ao longo dos últimos anos, tem-se ainda verificado o aumento do número de autores que consideram modelos de programação linear multiobjectivos (*Multi-Objective Integer Linear Programming*, MOMILP), e que incluem explicitamente uma função objetivo ambiental.

A maioria dos modelos de SCND presentes na literatura são modelos lineares bi-objetivo (*Bi-Objective Linear Programming*, BOLP), que consideram uma função objetivo económica (enquanto função objetivo tradicional) e uma função objetivo ambiental (como uma extensão dos modelos tradicionais de função objetivo única) (Eskandarpour et al., 2015). Neste sentido, destacam-se as contribuições de Chaabane et al. (2010), Amin e Zhang (2012), Talaei et al (2015) e Chibeles-Martins (2016), com foco nas decisões estratégicas e táticas de *network design* e planeamento de uma cadeia de abastecimento. Os modelos desenvolvidos consideram questões como seleção de fornecedores, localização de instalações, planeamento dos fluxos de matérias, níveis de produção e inventário associados, e assumem como principais objetivos a minimização dos custos totais e minimização do aquecimento global potencial, através das emissões de CO_2 .

No entanto, e com o recente aumento da consciencialização para a responsabilidade social e de potenciais benefícios na cadeia de abastecimento, verifica-se ao nível da literatura atual a preocupação com a inclusão dos três pilares da sustentabilidade num único modelo MOMILP. Neste sentido, destacam-se algumas exceções que consideram três funções objetivo associadas à sustentabilidade. Devika et al. (2013) apresentam como objetivos para o seu modelo de *network design* a minimização dos custos totais da cadeia e dos impactos ambientais e a maximização da empregabilidade gerada. Boukherroub et al. (2015) considera igualmente a integração das três dimensões da sustentabilidade na modelação do planeamento de fluxos de materiais ao longo de cadeia de abastecimento através dos custos totais, das emissões de associadas a cada entidade e atividade da cadeia (contabilizadas através de diferentes coeficientes) e da estabilidade de empregos e do desenvolvimento local. Mota et al. (2015; 2017) apresentam uma contribuição significativa ao nível de *design* e planeamento de cadeias de abastecimento sustentáveis, considerando a definição da sua estrutura, dos níveis de produção e inventário e dos fluxos de materiais, em que os principais objetivos remetem para a maximização do valor atual líquido (*Net Present Value*, NPV), minimização dos impactos ambientais baseada na metodologia de *Life-Cycle Assessment* (LCA) ReCiPe, e maximização de um indicador social baseado no Produto Interno Bruto (PIB) que favorece as entidades e as atividades da cadeia de abastecimento localizadas em regiões com menor PIB. Estes modelos destacam-se ainda dos restantes pelo aumento do nível de integração, pela consideração da incerteza num modelo estocástico de otimização de TBL (*Triple Bottom Line Optimization Modelling*, TBLOM), pela incorporação

de outras preocupações (além da localização-alocação) como a seleção de tecnologia (i.e., produção e remanufactura) e utilização de uma rede de transporte intermodal, e ainda pela avaliação do impacto das cadeias de abastecimento na população ou na sociedade (Mota et al., 2017).

4.3. Conclusões do Capítulo

A evolução e o aumento da complexidade das cadeias de abastecimento aeronáuticas ao longo do tempo tem conduzido à necessidade de desenvolvimento de novos métodos de otimização e de análise, que permitam relacionar e integrar o projeto (*design*) do avião com o projeto (*design*) da cadeia de abastecimento.

Na literatura verifica-se a inexistência de artigos focados especificamente na modelação de cadeias de abastecimento aeronáuticas, bem como investigação relativa ao planeamento estratégico e tático característicos das fases de SCND de novos programas, e da introdução de novos materiais e processos (Tang et al., 2013). No entanto, e ao longo dos últimos anos, diversos artigos têm sido publicados no âmbito da modelação genérica de cadeias de abastecimento sustentáveis, que envolvem definições e métodos que podem ser aplicados no contexto do problema identificado.

Entre os mais recentes trabalhos destacam-se as contribuições de Mota et al. (2015; 2017) pela integração dos três pilares da sustentabilidade num modelo TBLOM. O modelo surge apresentado com uma formulação geral que é aplicável a diversas cadeias de abastecimento com preocupações sustentáveis, entre as quais a cadeia de abastecimento aeronáutica. Trata-se de um modelo MOMILP de *design* e planeamento de cadeias de abastecimento sustentáveis, que recorre a métricas inovadoras e com menor grau de especificidade, como o NPV, os impactos ambientais e um indicador social baseado no PIB, permitindo uma avaliação mais flexível, global e integrada das cadeias de abastecimento.

Com base nestes trabalhos, torna-se possível perceber quer a complexidade inerente ao desenvolvimento de modelos de otimização quer o sucesso da sua aplicação enquanto ferramentas de apoio à decisão, que refletem os principais objetivos das cadeias de abastecimento. Os modelos desenvolvidos revelam-se adequados para representar as tendências, os desafios e as principais decisões estratégicas e táticas associadas à introdução de novos materiais compósitos e respetivos processos produtivos na cadeia de abastecimento aeronáutica. A análise destes modelos matemáticos de otimização permite, no contexto dos objetivos da presente dissertação, identificar as principais técnicas e métricas que deverão ser investigadas, exploradas e incluídas no desenvolvimento de novos produtos compósitos, de forma a potenciar o desenvolvimento futuro destas ferramentas de apoio à gestão. De facto, o desenvolvimento destes modelos requer todo um trabalho prévio de estudo e pesquisa, que providencie uma fonte de informação agregada e sistematizada para analisar e concluir de forma sustentável acerca de diversos problemas como: projeto da cadeia de abastecimento, planeamento da produção, planeamento de inventário, planeamento do fornecimento, planeamento de compras e planeamento da rede de transporte (Mota et al., 2017). Estes aspetos serão abordados nos seguintes capítulos onde se fará uma pesquisa, análise e comparação das principais diferenças económicas e ambientais associadas ao desenvolvimento de novos materiais compósitos e respetivas tecnologias associadas.

5. Caracterização de Cenários de Introdução de Novos Materiais Compósitos

O presente capítulo tem como objetivo descrever e caracterizar de forma detalhada o problema em estudo, apresentado na secção 3.5, através da recolha e da análise de informação que auxilie na definição e identificação de dados relevantes no contexto de introdução de novos materiais compósitos e respetivas tecnologias de fabrico na cadeia de abastecimento aeronáutica. Conforme referido anteriormente, para a utilização de modelos de ferramentas de apoio à decisão torna-se necessária a sistematização de informação associada ao mapeamento de diferentes cenários possíveis. No entanto, e no caso da indústria aeronáutica, esse mapeamento de novos processos não se encontra disponível, pelo que se torna necessário desenvolvê-lo. Como tal, o presente capítulo surge organizado em três secções. Na secção 5.1 é realizada uma breve apresentação dos conceitos fundamentais associados à classificação e caracterização de materiais compósitos e respetivas tecnologias de fabrico, necessários para a compreensão das especificidades inerentes ao problema analisado e das implicações ao nível da cadeia de abastecimento aeronáutica. Na secção 5.2, são definidos os cenários em estudo e para cada um dos cenários é apresentado o mapeamento do processo produtivo associado e são identificadas as principais etapas envolvidas. Na secção 5.3 são abordadas as principais diferenças económicas e ambientais associadas à integração na cadeia de abastecimento aeronáutica de cada um destes materiais e processos de produção selecionados, e quantificadas e comparadas com base no estudo de caso da Embraer.

5.1. Conceitos Fundamentais

Os materiais **compósitos** definem-se pela combinação de dois ou mais materiais e visam a obtenção de propriedades complementares desejadas ou melhoradas, que não se consigam obter de forma isolada (Rana e Fanguero, 2016). Geralmente, os materiais compósitos apresentam duas fases, onde se verifica a existência de uma fase de reforço dispersa numa fase de matriz (Kumar e Lohchab, 2016) (Figura 15).

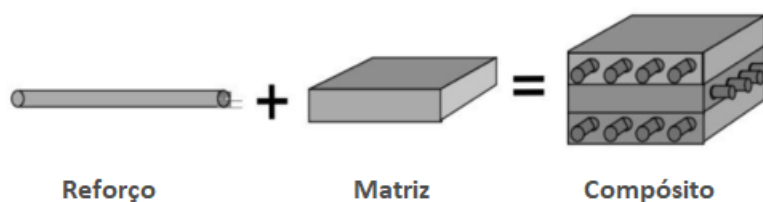


Figura 15 - Constituição de um material compósito (adaptado de Strong, 2008)

O **reforço** de um compósito é responsável pela força e rigidez necessária, ajudando a suportar o carregamento estrutural. Geralmente, os materiais de reforço apresentam-se na forma de fibras, tais como vidro, carbono e aramidas. Fibras de carbono são muito rígidas (entre três a dez vezes mais rígidas que as fibras de vidro) e fortes, motivo pelo qual são utilizadas numa vasta gama de aplicações estruturais aeronáuticas, como estabilizadores, controlos de voo, fuselagem primária e estrutura da asa (FAA, 2014). A **matriz**, por sua vez, pode ser do tipo polimérica, cerâmica ou metálica, e apresenta-se como a fase contínua do compósito. A sua principal função é dar forma à estrutura preenchendo os espaços vazios, sendo, como tal, facilmente moldada. Além disso, ajuda a manter a posição e a orientação do reforço,

protegendo-o ainda da abrasão e do contacto com o meio ambiente (Strong, 2008). Os materiais mais comuns com estas características são os polímeros (aplicados em 90% dos compósitos modernos), onde se destaca a utilização de resinas.

De acordo com o tipo de matriz polimérica utilizada, os materiais compósitos podem ser classificados em termoendurecíveis ou termoplásticos, apresentando diferentes comportamentos mecânicos, físicos e químicos perante variações de temperatura.

As matrizes **termoendurecíveis** são constituídas por polímeros cujas moléculas formam estruturas tridimensionais muito rígidas, e que, uma vez aquecidos assumem uma forma permanente, não podendo ser reprocessados. Este tipo de resinas revela uma viscosidade inicial inferior à das matrizes termoplásticas e apresenta, como tal, uma maior facilidade de impregnação do reforço. Na indústria aeronáutica destaca-se a utilização de resinas poliéster, epóxi, fenólica e poliamida (Morais et al., 2009). Apesar de apresentar um custo superior a outras alternativas, a epóxi é a matriz polimérica mais utilizada na indústria aeronáutica devido à elevada resistência, baixa viscosidade e baixas taxas de encolhimento, que reduzem a tendência para a obtenção de tensões de corte entre a resina e o reforço. Por outro lado, as matrizes **termoplásticas** caracterizam-se pela estrutura predominantemente linear, pela deformação com o aumento da temperatura e pela elevada tenacidade e resistência ao impacto. As propriedades térmicas destas matrizes são determinantes, quer pela forte influência no posterior desempenho do compósito à temperatura de serviço, quer pela facilidade com que podem ser processadas (McCrum et al., 1997) (Kaw, 2006). Na indústria aeronáutica, a existência de aplicações avançadas e muito exigentes do ponto de vista de desempenho à temperatura, remete geralmente para a utilização dos termoplásticos com maior resistência à temperatura e melhores propriedades mecânicas, entre os quais se destacam a poli-eter-imida (PEI), a polisulfona (PSU) e a poli-eter-eter-cetona (PEEK). O PEEK foi um dos primeiros termoplásticos de alto desempenho a ser qualificado para utilização em aplicações aeronáuticas e é atualmente a resina termoplástica mais utilizada no setor, por apresentar uma boa estabilidade térmica, facilidade de processamento, baixa inflamabilidade, baixa condutividade elétrica, alta resistência a solventes, e excelente tenacidade (Strong, 2008).

Atualmente, encontra-se disponível na literatura uma enorme variedade de processos de produção de compósitos, adequados aos diferentes materiais envolvidos, ao tipo de matriz utilizada (termoplástica ou termoendurecível), à orientação dos reforços, à forma e ao tamanho do componente a produzir, bem como às propriedades estruturais pretendidas ou exigidas pela aplicação final (Miracle e Donaldson, 2001).

De facto, a matriz e o reforço, podem ser combinados de inúmeras maneiras e processados através de um conjunto de etapas de fabrico específicas, tais como a moldagem (definição da forma da estrutura ou componente), a impregnação, a cura e a consolidação.

Na etapa de **impregnação**, fibras secas e resinas atuam como matérias-primas e são combinadas (i.e., impregnadas) de uma forma direta para posterior utilização. No entanto, e alternativamente, é possível utilizar como matéria-prima um material pré-impregnado, denominado *prepreg*. O **prepreg** apresenta-se como um material intermédio, onde um conjunto de fibras foi previamente embutido numa matriz termoplástica ou termoendurecível. Apesar de apresentar um custo superior, a utilização deste tipo de material é muito comum em aplicações aeronáuticas, uma vez que garante uma proporção ótima entre as fibras e a resina, proporcionando uma maior eficiência na relação entre o peso e a resistência. Além disso,

permite ainda aos fabricantes de peças em materiais compósitos uma redução no número de etapas necessárias para a produção do componente ou estrutura final (Mouritz, 2012).

Nos processos de obtenção de materiais compósitos termoendurecíveis, verifica-se a existência de uma etapa específica fundamental, denominada cura. A **cura** define-se como uma reação física e química provocada por calor, feixes de eletrões ou aditivos químicos, que conduz ao endurecimento da matriz polimérica (Mallick, 1997). Nesta transformação, a resina, num estado líquido ou semissólido, é convertida num polímero totalmente rígido (polimerização), ocorre o molhamento das fibras pela resina, verifica-se a remoção de ar e o estabelecimento de ligações entre as diferentes camadas do compósito, permitindo uma eficaz consolidação do molde compósito.

Considera-se a existência de três **estágios de cura** (i.e., fases) fundamentais (U.S. Department of Energy, 2015):

- Estágio A: ocorre quando a resina entra em contacto com o agente de cura (como por exemplo, o endurecedor ou outros aditivos), mas a reação química ainda não começou;
- Estágio B: verifica-se quando a reação química já começou e o material assume uma textura mais espessa e viscosa. As resinas dos materiais pré-impregnados (*prepregs*) encontram-se no estágio de cura B, apresentando uma maior viscosidade e, assim,, com melhores características de manuseio. No entanto, uma vez que estas resinas se encontram parcialmente curadas, necessitam de ser armazenadas a temperaturas negativas de forma a impedir o progresso da cura. Enquanto congelada, a resina do *prepreg* mantém-se no estágio B e apenas retoma o processo de cura quando descongelada e aquecida novamente;
- Estágio C: a resina encontra-se totalmente curada.

De facto, a etapa de cura caracteriza-se pelo tempo, temperatura e pressão utilizados para consolidar a resina termoendurecível ou o *prepreg*. Durante esta etapa, verifica-se o aquecimento até à temperatura de cura e a sua manutenção durante um intervalo de tempo específico, de forma a promover o processo de polimerização (Figura 16).

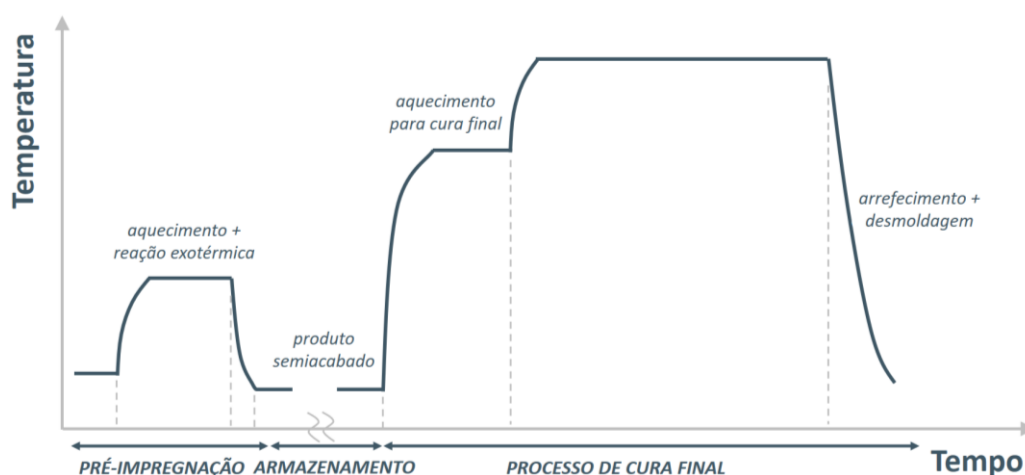


Figura 16 - Ciclo típico de produção de um compósito termoendurecível (adaptado de Bourban et al., 2000)

Importa, no entanto, referir que existem resinas projetadas para curar à temperatura ambiente (nomeadamente entre os 15°C e os 25°C) ou a temperaturas elevadas (entre 50°C e 250°C) durante

intervalos de tempo muito variáveis (desde alguns segundos, a várias horas ou dias) (Advani e Sozer, 2003). Como tal, e de acordo com a resina utilizada, a cura pode ocorrer deixando a peça ao ar, enquanto as reações químicas ou o arrefecimento ocorre, ou através da utilização de fornos, estufas ou autoclaves. Durante esta etapa, e independentemente do processo de cura, é frequente a utilização de um **saco de vácuo**. Este saco, tipicamente de plástico, é selado envolvendo todo o material, e o ar no seu interior é posteriormente removido (com o auxílio de uma bomba de vácuo), permitindo a eliminação de vazios, o estabelecimento de ligações fortes e seguras e a eficaz consolidação das camadas. Tradicionalmente, para a obtenção de propriedades excepcionais na produção de compósitos de elevada precisão e desempenho, os materiais - envolvidos num saco de vácuo -, são curados em autoclave, sendo esta apresentada como a tecnologia mais utilizada na indústria aeronáutica (Miracle e Donaldson, 2001). O **autoclave** é uma estrutura cilíndrica pressurizada, que funciona a altas temperaturas e onde é possível obter pressões superiores à pressão atmosférica através da injeção de azoto líquido. A utilização de pressões elevadas durante a cura permite obter consideráveis e rigorosos teores de fibra (relação resina-fibra), bem como um baixo volume de vazios, característicos de uma excelente eficiência estrutural.

A etapa de cura termina com a fase de solidificação, após a qual a mobilidade da microestrutura estrutural do compósito obtido é extremamente limitada. O procedimento de cura nos compósitos termoendurecíveis é, portanto, considerado permanente e irreversível, e a forma da peça final é fixa. Como tal, a subsequente exposição do compósito a elevadas temperaturas irá provocar a degradação do material e não o seu derretimento.

Por outro lado, os compósitos termoplásticos apresentam características distintas devido à natureza da sua matriz (conforme supramencionado). Quando aquecidos a elevadas temperaturas tornam-se mais fluidos, podendo derreter e ser moldados novamente, sem que as suas propriedades físicas sejam negativamente afetadas. A sua estrutura é, assim, reversível e, como tal, não se verifica a etapa de cura (característica dos compósitos termoendurecíveis), uma vez que durante o seu processamento não ocorre qualquer transformação química (Gay e Hoa, 2007).

Ao contrário das matrizes termoendurecíveis, facilmente manuseáveis antes da cura, as matrizes termoplásticas apresentam-se como uma matéria-prima de estrutura rígida por terem sido previamente polimerizadas. Assim, e em vez da cura, a produção de compósitos termoplásticos considera o aquecimento sob pressão, a consolidação e o arrefecimento, conforme ilustrado na Figura 17.

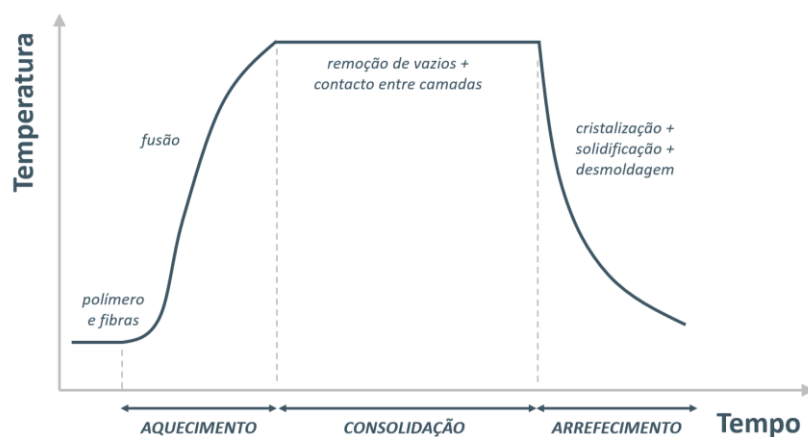


Figura 17 - Ciclo típico de produção de um compósito termoplástico (adaptado de Bourban et al., 2000)

Após a fusão do polímero, devido ao aumento da temperatura da matriz ou do *prepreg* acima da sua temperatura de fusão, dá-se a **consolidação**. Esta etapa envolve a remoção de ar (vazios), o molhamento das fibras pela resina, a ligação coesa (não química) entre as camadas e termina com o arrefecimento e respetiva cristalização (quando utilizados polímeros semi-cristalinos) e solidificação do compósito final (Bourban et al., 2001).

“Historicamente, os compósitos termoplásticos revelavam menores propriedades mecânicas comparativamente aos compósitos termoendurecíveis, devido em grande parte à ineficiência dos processos de impregnação (perante os elevados níveis de viscosidade apresentados)” (Bannister, 2001). Como tal, verificava-se uma fraca adesão entre as fibras e matriz, que durante várias décadas condicionou a utilização deste tipo de compósitos em aplicações estruturais (Hooghe e Edwards, 1999). Com o desenvolvimento de tecnologias de transformação mais eficientes ao longo dos últimos anos, o aumento da qualidade e a redução do custo de *prepregs* termoplásticos, muitos dos desafios apontados a este tipo de compósitos têm sido superados, e a sua utilização tem vindo a crescer em número de aplicações (Stewart, 2009).

De facto, e até muito recentemente, a produção de compósitos através de autoclave era apontada como o processo líder e padrão da indústria aeronáutica, permitindo a obtenção de componentes leves e fortes, com rigorosos teores de fibra, ausência de vazios e excelentes propriedades mecânicas. No entanto, importa referir que a utilização de autoclaves acarreta elevados custos de aquisição e operação (associados a longos ciclos de cura e grandes consumos energéticos). Além disso, “impõe um ambiente de produção relativamente inflexível, uma vez que o projeto de novas peças é sempre condicionado pelo tamanho do autoclave disponível, as taxas de produção estão restringidas pela calendarização da produção e, em vários casos, são utilizados de forma ineficiente para a produção de peças de pequena dimensão” (Centea et al., 2015) (Mason, 2006).

No sentido de reduzir os custos e os tempos de produção associados à produção de materiais compósitos, os principais OEMs encontram-se atualmente focados na busca de novas soluções e na otimização dos processos de produção de compósitos, não apenas termoplásticos, mas também termoendurecíveis, de forma a que possam apresentar alternativas eficientes à cura em autoclave (Ridgard, 2009). Todos estes processos, que utilizem fibras e resinas ou *prepregs* específicos que possam ser curados ou processados apenas a vácuo, em qualquer meio que não o autoclave, à pressão atmosférica, e que ainda assim, apresentem características e propriedades semelhantes, são designados **processos fora de autoclave**, ou processos *Out-of-Autoclave*, OOA) (Harshe, 2015).

5.2. Definição de Cenários em Estudo

Tendo em consideração os principais desafios associados aos materiais compósitos utilizados na indústria aeronáutica (referidos na secção 2.5) bem como as mais recentes tendências identificadas ao nível do desenvolvimento de novos processos e materiais compósitos termoendurecíveis e termoplásticos (descritas na secção 5.1), são identificados no âmbito do projeto IAMAT três processos OOA, alternativos ao processo atual padrão de cura em autoclave, que exploram potenciais materiais compósitos avançados. Ainda no projeto IAMAT, pretendem-se estudar de forma específica as oportunidades inerentes à utilização destes materiais avançados numa estrutura de uma aeronave da Embraer, sendo numa primeira fase

realizados ensaios e avaliadas propriedades em *testbeds* (isto é, demonstradores ou protótipos de um componente, em pequena escala) produzidos com os respetivos materiais e processos seleccionados.

No entanto, “os materiais e as diferentes tecnologias associadas à produção destes componentes correspondem apenas a uma parte do sucesso do NPD, pelo que a inovação deverá enfrentar não apenas os desafios associados ao fabrico, mas também avaliar os custos de produção e os impactos ambientais, de forma a permitir a sua implementação na cadeia de abastecimento, de forma sustentável” (IAMAT, 2017). Assim, o principal foco deste capítulo é a caracterização e quantificação das principais diferenças económicas e ambientais associadas à integração na cadeia de abastecimento de cada um destes três processos OOA e respetivos materiais compósitos seleccionados. Pretende-se ainda caracterizar o processo de autoclave utilizado atualmente, de forma a tornar possível uma posterior comparação. Para tal, são definidos quatro cenários em estudo, conforme representado na Tabela 3.

Tabela 3 - Cenários em Estudo

Cenário	Processo de Fabrico	Tipo de Matriz Utilizada
A	Autoclave ¹	Termoendurecível
B	Infusão de Resina Assistida por Vácuo (VARI)	Termoendurecível
C	<i>Vacuum Bag Only</i> (VBO)	Termoendurecível
D	Termotransformação por prensagem a quente (<i>hot stamping</i>)	Termoplástica

Dos processos de fabrico associados a cada um dos cenários indicados, importa referir que os cenários A, B e C se encontram associados à produção de compósitos termoendurecíveis, e que o cenário D representa a produção de compósitos termoplásticos. Embora todos os processos considerados visem a produção de compósitos finais que apresentem a qualidade necessária para satisfazer os requisitos e os padrões de qualidade exigidos pela indústria no fabrico de componentes estruturais principais do avião, estes assumem várias diferenças e especificidades características, nomeadamente associadas ao tipo de matriz utilizada, e que se refletem na cadeia de abastecimento.

Para cada um dos cenários definidos, segue-se a apresentação do mapeamento do processo produtivo associado e são identificadas as principais etapas envolvidas.

5.2.1. Cenário A: Processo em Autoclave

O processo de produção de compósitos em autoclave é apresentado como o cenário base do presente estudo, sendo atualmente considerado a técnica mais comum na indústria aeronáutica para a produção de componentes estruturais de elevada precisão e desempenho. Este processo, destinado à cura e consolidação de camadas empilhadas de *prepregs* termoendurecíveis, encontra-se mapeado na Figura 18.

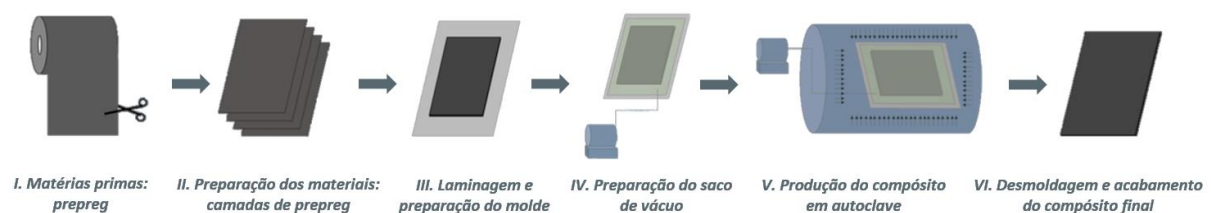


Figura 18 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoendurecíveis em autoclave

¹ Processo utilizado atualmente.

O processo tem início com a obtenção das matérias-primas, isto o *prepreg* (etapa I). Uma vez que *prepreg* é constituído por fibras pré-impregnadas em resina que se encontra parcialmente curada, surge a necessidade de transportar e posteriormente conservar este material (comercializado sob a forma de rolo), em condições especiais de refrigeração, isto é, a -18°C . Seguidamente, na etapa II, ocorre a preparação dos materiais, onde diferentes camadas de material são cortadas, com o formato e o tamanho exigidos para a produção do componente, a partir do rolo de *prepreg*. As camadas preparadas são de imediato empilhadas (laminagem), manualmente ou através de máquinas de laminação automáticas, de acordo com a sequência projetada (etapa III). Na etapa IV, é realizado um saco de vácuo, que envolve toda a peça, e que é devidamente selado de forma a promover uma eficaz compactação das camadas e eliminação de vazios. Posteriormente, a peça é introduzida no autoclave, onde são realizados ciclos de cura (um ou mais, e de durações variáveis, de acordo com o tipo *prepreg* utilizado) através da combinação de vácuo, temperaturas e pressões elevadas, de forma a promover o fluxo controlado de resina, a remoção de ar e a consolidação do compósito (etapa V). Uma vez terminada a cura, são reduzidos os valores de temperatura e pressão e ocorre a desmoldagem da peça. Dependendo da aplicação final do componente obtido, são ainda realizadas operações de acabamento, como o corte ou polimento (etapa VI).

5.2.2. Cenário B: Processo de Infusão de Resina Assistido por Vácuo (VARI)

O processo de Infusão de Resina Assistido por Vácuo (*Vacuum Assisted Resin Infusion, VARI*) apresenta-se como um processo OOA que permite obter compósitos termoendurecíveis de elevada qualidade e com um número reduzido de imperfeições. Este processo é considerado uma variante do processo de Moldagem por Transferência de Resina (*Resin Transfer Molding, RTM*) e tem inclusive vindo a substituí-lo devido à sua simplicidade, ao baixo investimento inicial (devido ao uso de apenas um molde), e à elevada flexibilidade de *design*, na medida em que permite projetar compósitos com geometrias complexas e personalizadas. A principal diferença relativamente ao processo de RTM verifica-se na substituição do contra-molde por um saco de vácuo, durante a etapa de infusão de resina, conforme ilustrado na Figura 19. No entanto, este processo apresenta ainda algumas limitações, nomeadamente ao nível do acabamento superficial na face de contacto com o saco de vácuo.

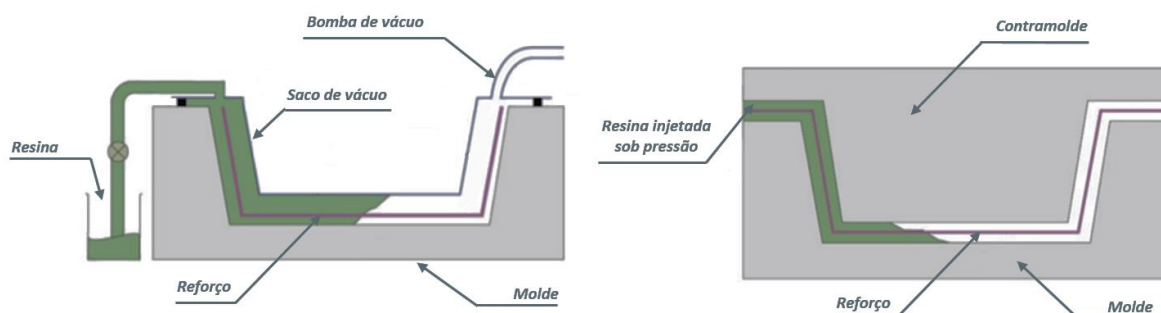


Figura 19 - Representação esquemática dos processos VARI (esquerda) e RTM (direita) (adaptado de NetComposites, 2017)

No processo de infusão considerado, a resina líquida, geralmente do tipo epóxi, é injetada sobre os tecidos de fibra secos (impregnação), numa pré-forma aberta, fluindo através de canais próprios, de modo a preencher todos os espaços vazios. O processo de infusão considerado encontra-se mapeado na Figura 20

e considera como matérias-primas fibras secas (comercializadas sob a forma de rolos) e resina (pouco viscosa, armazenada em recipientes cilíndricos (etapa I)).

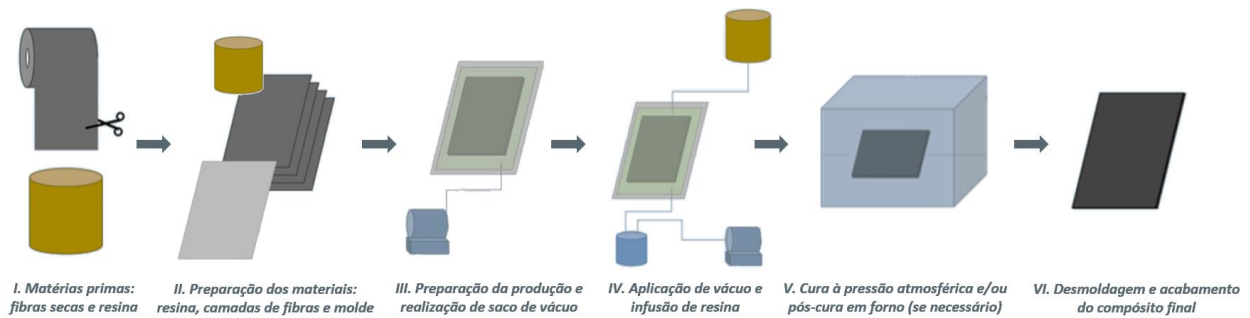


Figura 20 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoendurecíveis através da infusão de resina

Inicialmente procede-se à preparação dos materiais (etapa II), através de três passos que podem ser desenvolvidos paralelamente:

- Preparação do molde que servirá de suporte à produção do compósito - através da aplicação de um desmoldante, isto é, um produto aplicado na superfície do molde que permitirá no final do processo uma fácil e eficaz separação entre o compósito e o molde;
- Corte das camadas de tecido de fibras necessárias (material de reforço) - com as dimensões e geometria adequadas ao molde;
- Preparação da resina - de acordo com as proporções associadas ao componente específico. Existe uma grande variedade de resinas monocomponentes disponíveis no mercado. No entanto, verifica-se cada vez mais a utilização de resinas bicomponentes, isto é, constituídas por dois componentes. Nos casos em que uma resina bicomponente é selecionada, procede-se nesta etapa a um longo processo de aquecimento dos componentes dessa resina (a cerca de 80°C) que em alguns casos é mantido durante um período de 12 horas, e posteriormente realiza-se ainda a mistura desses componentes.

Na etapa III, ocorre a preparação da infusão, onde o material de reforço fibroso previamente cortado é colocado sobre o molde (manualmente ou através da utilização de máquinas), e é realizado um saco de vácuo devidamente selado. Adicionalmente, e se necessário (dependendo das materiais primas utilizadas e das propriedades desejadas), existe um pré-aquecimento do molde e da resina (de forma a tornar-se mais líquida, menos viscosa e assim fluir mais facilmente). Posteriormente, uma bomba de vácuo é utilizada para remover todo o ar presente nas fibras do reforço e consolidar os materiais.

Importa referir nesta etapa (pré-infusão) a possibilidade de realização de ciclos de compactação – uma técnica cada vez mais comum em processos OOA, que através de gradientes de pressão aumenta a compactação das fibras, levando à diminuição da espessura do laminado, permitindo ainda a obtenção de uma espessura uniforme (Niggemann et al., 2008). Após a compactação, e ainda em vácuo, é injetada a resina que, devido ao diferencial de pressão causado pelo vácuo, é forçada a escoar através das fibras e a cobrir todas as cavidades (etapa IV, onde ocorre a impregnação, conforme a representação da Figura 19 - à esquerda). Quando as fibras se encontram embebidas em resina na sua totalidade, os canais de entrada são selados e o impregnado é deixado a curar (etapa V) (Ageorges e Ye, 2002). O tempo de cura é variável, dependendo do tipo de resina utilizada. A cura pode ocorrer à temperatura ambiente durante várias horas, sendo nesses casos seguida de uma etapa de pós-cura, num forno ou estufa, ou alternativamente, ser

diretamente curada num forno (a temperaturas compreendidas entre 80°C e 180°C, conforme recomendado pelo fabricante da resina utilizada) durante um período de tempo inferior e não apresentar qualquer etapa de pós-cura.

5.2.3. Cenário C: Processo de Vacuum Bag Only (VBO)

O processo de fabrico em vácuo, também designado por processo de *Vacuum Bag Only* (VBO), é um processo OOA, que depende essencialmente da operação de vácuo para remover todos os vazios aprisionados antes da fase de cura, bem como da pressão diferencial entre o interior e o exterior da bolsa de vácuo para consolidar as diferentes camadas durante a cura.

O mapeamento associado ao processo de VBO, considerado para a produção de compósitos termoendurecíveis, encontra-se representado na Figura 21. De facto, este processo apresenta um conjunto de etapas de processamento semelhante ao processo de produção em autoclave (Cenário A), mas cuja etapa de cura ocorre a temperaturas inferiores (ou até, em alguns casos, à temperatura ambiente), num simples forno ou estufa, e à pressão atmosférica, não sendo necessário o envolvimento do autoclave.

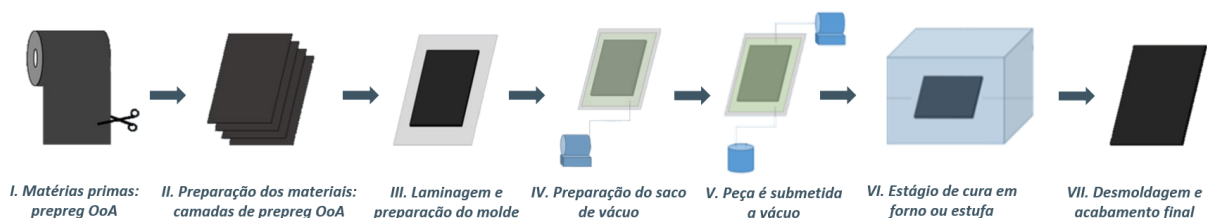


Figura 21 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoendurecíveis através de VBO

A principal matéria-prima envolvida no processo é o *prepreg* OOA (etapa I). De facto, o sucesso para a obtenção de componentes compósitos com teor de vazios muito reduzido baseia-se no *design* destes materiais *prepreg* OOA, específicos para o processamento fora de autoclave. Os *prepreg* OOA, de natureza porosa, são projetados para facilitar a remoção de ar, através de canais de vácuo próprios. Esses canais consistem em áreas de fibra seca, criados durante a impregnação parcial total ou parcial das fibras, que funcionam como caminhos abertos no interior do material (Rana e Fanguero, 2016). À semelhança dos *prepregs* utilizados no processo em autoclave, a resina pré-impregnada encontra-se parcialmente curada, sendo, como tal, necessário transportar e conservar este material (comercializado sob a forma de rolo), em condições especiais de refrigeração.

Para a realização do VBO, são cortadas camadas do rolo de *prepreg*, com o formato e o tamanho exigidos para a produção do componente (etapa II). Posteriormente é preparado o molde, através do empilhamento das camadas de *prepreg* (laminagem) sobre uma plataforma de apoio (etapa III). De forma a facilitar o processo de remoção do compósito da plataforma no final do processo, é ainda nesta etapa aplicado um filme de *teflon* entre as superfícies. Na etapa IV, é preparado o saco de vácuo, em toda a superfície exterior da peça, obtendo-se uma estrutura semelhante à representada na Figura 22.

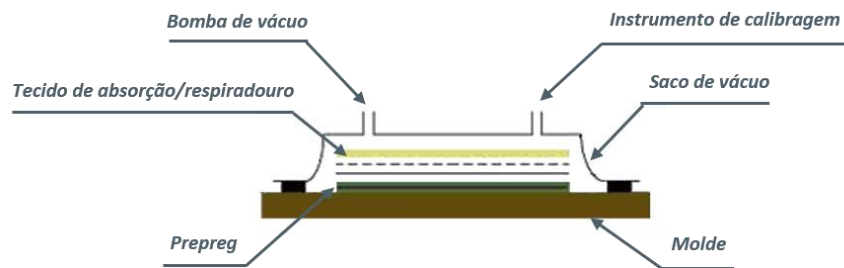


Figura 22 - Representação esquemática do processo VBO

Tal como apresentado previamente no processo de infusão, também no processo de VBO é possível realização de ciclos de compactação, de forma a obter compósitos finais de melhores propriedades. Seguidamente, ocorre o processo de vácuo (etapa V). Com o auxílio de uma bomba de vácuo, todo o ar no interior do saco é removido, criando-se uma atmosfera de pressão que provoca a consolidação da estrutura. Ao introduzir a peça num forno ou estufa, a rede porosa de canais do *prepreg*, agora evacuada, permitirá que a resina aquecida comece a fluir (etapa VI). Esta etapa pode desenvolver-se através de um ou dois ciclos de cura consecutivos (dependendo das especificações do material utilizado). Na presença de dois ciclos de cura, é aplicada uma temperatura superior no segundo ciclo. Uma vez terminada a cura, a peça é arrefecida, desmoldada, e são realizadas operações de acabamento necessárias, como corte ou polimento (etapa VII).

5.2.4. Cenário D: Processo de Termotransformação - Prensagem a Quente

Contrariamente aos cenários supramencionados, destinados à produção de compósitos termoendurecíveis, o Cenário D considera um processo de produção de compósitos de matriz termoplástica. Existe no mercado uma elevada variedade de processos disponíveis, sendo que os processos de enformação são atualmente os mais comuns, devido aos rápidos ciclos de processamento (comparativamente aos compósitos de matriz termoendurecível). Dos processos de enformação, o processo de Prensagem a Quente (*Hot Stamping*) é o mais utilizado, através de um conjunto de etapas de termotransformação, semelhante à verificada nos processos industriais de processamento de chapa metálica, onde um material é enformado e moldado entre os pratos (i.e., moldes) de uma prensa. As principais etapas do processo selecionado encontram-se mapeadas na Figura 23.

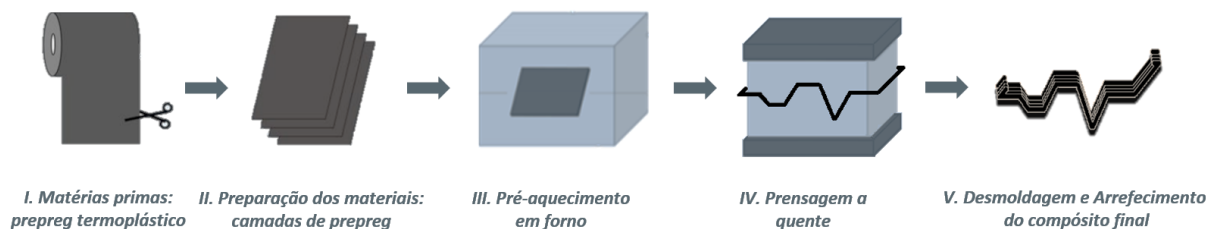


Figura 23 - Mapeamento do processo de produção de compósitos termoplásticos por prensagem a quente

Na primeira etapa, são obtidas as matérias-primas: um *prepreg* termoplástico, comercializados sob a forma de rolo de tecido, totalmente impregnado e polimerizado. Dada a natureza termoplástica da resina utilizada na impregnação das fibras de carbono, este material pode ser transportado e armazenado à temperatura ambiente, apresentando um tempo de vida útil indefinido. Do rolo de *prepreg* são cortadas as camadas necessárias para a produção do componente, e agrupadas de acordo com a sequência projetada (etapa II).

Importa referir que, neste processo, o tempo despendido no empilhamento das diversas camadas é bastante superior ao identificado nos restantes cenários, devido à necessidade de alinhar de forma exata e precisa as diferentes camadas, de acordo com a geometria do molde utilizado, para uma correta operação de prensagem. Seguidamente, o material é pré-aquecido num forno, a uma temperatura elevada, mas um pouco inferior à temperatura de fusão, de forma a amolecer o material, tornando-o facilmente moldável (etapa III). Após atingir a temperatura recomendada pelo fornecedor, o material, ainda quente, é transferido para uma prensa e imediatamente prensado, em contacto com o molde, adquirindo a forma e a geometria desejada (etapa IV). Dependendo do material utilizado e da aplicação desejada, o material pode ser arrefecido no interior do molde, sob pressão, de forma a adquirir estabilidade dimensional. Por fim, ocorre a desmoldagem e o material continua a arrefecer à temperatura ambiente (etapa V).

5.3. Recolha e Análise de Dados

De forma a realizar uma análise integrada dos impactos económicos e ambientais inerentes a cada um dos materiais e processos de fabrico mapeados (na secção 5.2)., torna-se necessário descrever e quantificar os aspetos fundamentais associados à sua introdução na cadeia de abastecimento da Embraer. No entanto, a obtenção dos dados relevantes através de uma abordagem direta ao OEM revela-se, no presente caso de estudo, um processo ineficiente e insuficiente para uma abordagem exaustiva e realista ao problema em estudo, quer pela existência de políticas de confidencialidade e proteção de dados estratégicos associados aos processos utilizados atualmente, quer pela inexistência de *know-how* relativo à aplicação dos novos processos em larga escala, e sua respetiva integração numa cadeia de abastecimento global. Assim, surge a necessidade de definir pressupostos e adotar estratégias de simplificação da complexidade do problema, baseadas nos principais dados e parâmetros obtidos na literatura ou associados às condições de experimentação do projeto IAMAT. Na presente secção é realizada a recolha, o tratamento e a sistematização desses dados, que caracterizam os materiais e os processos de produção apresentados e mapeados previamente - tendo em vista a sua integração na cadeia de abastecimento da Embraer. As diferentes informações abordadas surgem agrupados por categorias, nomeadamente, estrutura da cadeia de abastecimento, fornecedores e matérias-primas, produto e processos de fabrico, transporte e parâmetros ambientais.

5.3.1. Estrutura da Cadeia de Abastecimento

No presente caso de estudo pretendem-se analisar os principais dados, informações, características e implicações com impacto na cadeia de abastecimento da Embraer, que assumam influência nas decisões estratégicas, táticas e operacionais associadas ao seu projeto e planeamento, perante a integração de novos materiais e processos de produção de compósitos. Pretende-se desta forma explorar a estrutura de rede, as entidades e as principais operações associadas a cada um dos cenários identificados, enquanto possíveis realidades implementáveis, na produção do modelo E195-E2, cujas asas serão fabricadas pela Embraer Portugal – Compósitos e Estruturas Metálicas. No entanto, e de acordo com as justificações apresentadas anteriormente relativas à disponibilidade de informação, o produto modelado (i.e., simulado) na cadeia de abastecimento da Embraer será um demonstrador (*test-bed*), na medida em que representa

um componente possível de replicar (ou escalar) futuramente, de forma a obter uma estrutura primária de uma aeronave, como por exemplo, as asas. Como tal, os dados apresentados não correspondem aos valores reais de uma situação de larga escala, sendo apenas válidos no âmbito desta dissertação, no contexto da produção do demonstrador. No entanto, considera-se que apresentam a mesma ordem de relação e magnitude nos diferentes cenários, viabilizando as soluções e conclusões obtidas.

A cadeia de abastecimento considerada para a produção do demonstrador representa um segmento da cadeia de abastecimento da Embraer e a sua representação genérica envolve três níveis (*tiers*), conforme representado na Figura 24.

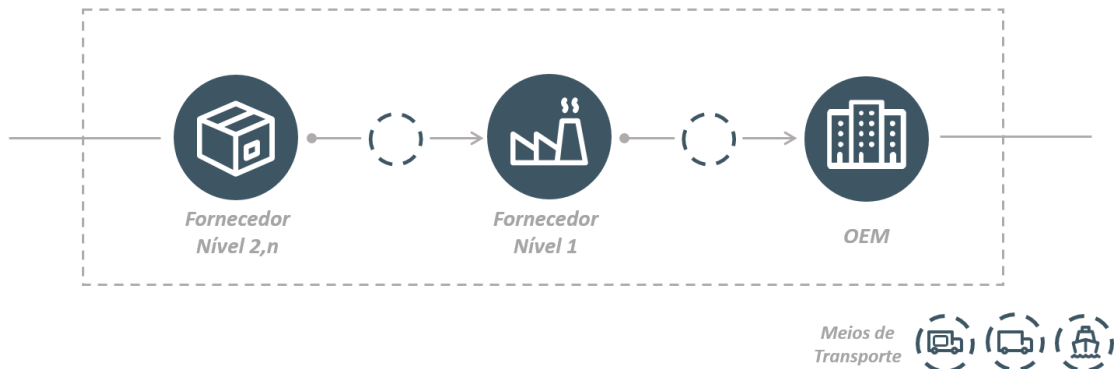


Figura 24 - Representação genérica da rede considerada

A cadeia de abastecimento encontra-se centralizada no fornecedor do nível 1, onde ocorre a produção através de um conjunto de etapas associadas aos processos produtivos identificados. As matérias-primas envolvidas nesses processos são enviadas de fornecedores de nível 2 (a nível n) diretamente para as instalações do fornecedor de nível 1, onde ocorre a sua transformação em produto final. Posteriormente o produto é transportado para o OEM, de forma a ser incorporado na montagem final do avião.

O transporte realizado entre as diferentes entidades poderá ser unimodal ou intermodal, dependendo da localização das entidades envolvidas, isto é, situadas num mesmo continente ou em continentes distintos, respetivamente (conforme detalhado na secção 5.2.3). As entidades consideradas no presente caso de estudo encontram-se representadas no mapa da Figura 25, com um respetivo código atribuído.

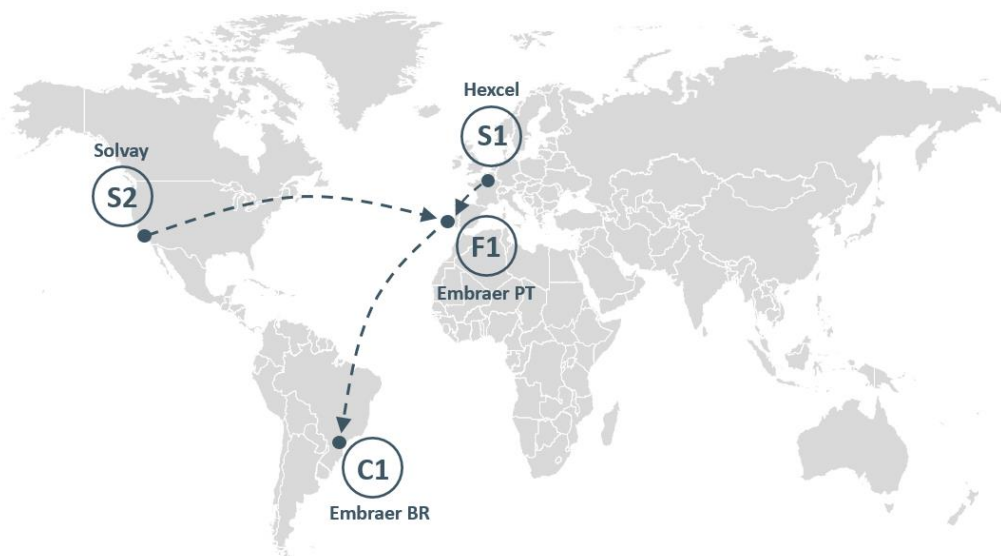


Figura 25 - Estrutura e respetivos fluxos da Cadeia de Abastecimento

A Embraer Portugal – Compósitos e Estruturas Metálicas (F1), apresenta-se como o fornecedor de nível 1 responsável pela produção dos materiais compósitos na sua fábrica localizada em Évora, Portugal. O fabrico destes materiais será testado para os diferentes processos de produção identificados, de forma mutuamente exclusiva, através da comparação de cenários. Nos cenários associados à produção de materiais compósitos termoendurecíveis, todas as matérias-primas consideradas são fornecidas pela empresa Hexcel (S1) e enviadas e a partir da sua localização em Dagneux, França. No cenário que envolve a produção de materiais compósitos termoplásticos, a matéria-prima associada é fornecida pela empresa Cytec, pertencente ao grupo Solvay (S2), a partir de Anaheim, Califórnia (USA). Uma vez terminada a produção, os componentes fabricados são enviados para o OEM, a Embraer Brasil (C1), que na sua unidade industrial de São José dos Campos procede à operação de montagem final dos aviões, através da integração de todos os sistemas.

5.3.2. Fornecedores e Matérias-Primas

Devido às especificidades da indústria aeronáutica, à exigência de produtos de alto desempenho, processos de certificação rigorosos e requisitos de segurança apertados no abastecimento, os OEMs têm selecionado fornecedores de elevada dimensão, que se revelem parcialmente integrados, através de parcerias de risco e contratos de desenvolvimento de longo prazo (por vezes superiores a vinte anos). Consequentemente, têm facilitado a emergência, e a consolidação na indústria, de um número reduzido de fornecedores de matérias-primas para a produção de estruturas de aviões comerciais em compósitos. Neste sentido, destacam-se dois atores principais, a Hexcel e a Cytec Industries, enquanto fornecedores integrados, líderes na indústria de compósitos, que controlam 80% do mercado de fibras pré-impregnadas com resina (*prepreg*), para aplicações aeronáuticas (Oliver Wyman, 2015). O conhecimento adquirido, as economias de experiência associadas à produção de matérias com propriedades de referência e o compromisso pelo desenvolvimento e otimização de novas soluções, apresentam-se como os principais fatores para a sua exclusividade de seleção no presente caso de estudo. No entanto, espera-se que num futuro próximo, com a consolidação destes novos processos OOA e respetiva implementação e difusão na indústria aeronáutica, outras empresas possam ser certificadas e considerados possíveis parceiros no fornecimento de materiais. A Hexcel, atualmente líder mundial de produtos compósitos avançados, apresenta-se como a empresa detentora do maior número de produtos certificados para aplicações aeronáuticas (Hexcel, 2016). Possui um vasto espectro de soluções versáteis e de elevado desempenho, onde se incluem as resinas epóxi, as fibras de carbono e os *prepregs* termoendurecíveis utilizados para os processos de produção dentro e fora de autoclave, associados aos cenários A, B e C do caso de estudo.

A Cytec (grupo Solvay) é reconhecida globalmente pela produção de sistemas pré-impregnados termoplásticos, considerados padrão da indústria em termos de rigidez, resistência ao impacto e desempenho térmico. As suas cujas excelentes propriedades resultam utilização de uma matriz PEEK, da molhagem total das fibras e interface fibra-matriz obtida durante o processo de impregnação (Cytec, 2017). Esta será a empresa responsável pelo fornecimento da matéria-prima envolvida no cenário D, um *prepreg* termoplástico.

As matérias-primas fornecidas pelas empresas apresentadas e associadas à produção do demonstrador em cada um dos cenários identificados, encontram-se representadas na Tabela 4, identificadas numericamente

de 1 a 5, para a consequente facilidade de interpretação. São ainda indicadas as temperaturas recomendadas de transporte e armazenamento, as unidades de medida e o custo unitário de cada uma das matérias-primas, obtidas através do contacto direto com os fornecedores e a partir de ordens de compra realizadas pelo IAMAT.

Tabela 4 - Caracterização das matérias-primas

Matérias-Primas	Cód.	Cenário	Fornecedor	Temp.	Custo Unitário	Unidade de Medida
Prepreg HexPly M21	M1	A	Hexcel	-18°C	60,78 €	m ²
Reforço de Fibras de Carbono Hitape AS7	M2	B	Hexcel	T. Ambiente	37,49 €	m ²
Resina Epóxi HexFlow RTM6-2	M3	B	Hexcel	+5°C	71,40 €	kg
Prepreg (OOA) HexPly M56	M4	C	Hexcel	-18°C	64,68 €	m ²
Prepreg Termoplástico APC-2-PEEK	M5	D	Solvay	T. Ambiente	204,14 €	kg

As matérias-primas M1 e M4, enquanto materiais pré-impregnados termoendurecíveis, parcialmente curados, necessitam de ser transportados e armazenados a temperaturas negativas, de forma a impedir a reativação da cura. Estes materiais são comercializados sob a forma de rolos e apresentam um custo unitário por metro quadrado. Contrariamente, e apesar de se tratar também de um *prepreg*, a matéria-prima M5 é termoplástica, e por se encontrar totalmente polimerizada, é transportada e armazenada à temperatura ambiente, apresentando um tempo de vida útil indefinido. Além disso, e embora seja igualmente vendida sob a forma de rolo de tecido, é comercializada por quilograma. O cenário B é o único que considera a necessidade de aquisição de duas matérias-primas: reforço de fibras de carbono secas, (comercializado em metros quadrados de rolos, manuseados à temperatura ambiente) e resina epóxi, semilíquida, transportada em barris. Ao contrário dos restantes cenários, em que a matéria-prima já sofreu a etapa de impregnação (motivo pelos quais se designam materiais pré-impregnados), o processo realizado no cenário B envolve, previamente à etapa de cura, um processo de impregnação, onde a resina é impregnada nas fibras, formando um só componente (conforme referido na secção 5.2.2).

Comparativamente a outras resinas disponíveis no mercado a epóxi RTM6-2 considerada no presente cenário apresenta como vantagem a possibilidade de transporte e armazenamento a temperaturas superiores às restantes (+5°C ao invés de -18°C). De acordo com a informação disponibilizada na ordem de compra efetuada pelo IAMAT, considera-se que o transporte desta resina ocorre à temperatura ambiente, uma vez que o seu tempo de vida útil, a esta temperatura, é extenso (12 meses) e superior ao prazo no qual a matéria será consumida.

5.3.3. Produto e dos Processos de Fabrico

Conforme referido previamente, o produto para o qual se apresenta o estudo da cadeia de abastecimento é um demonstrador (*test-bed*), isto é, um painel de material compósito, que representa toda uma família de possíveis produtos de aplicação aeronáutica onde este componente possa ser futuramente integrado. O demonstrador em estudo é um painel T-Rigidificado, composto pelo uma base inferior, denominada pele (*skin*), e por um Rigidificador em “T” (Figura 26).

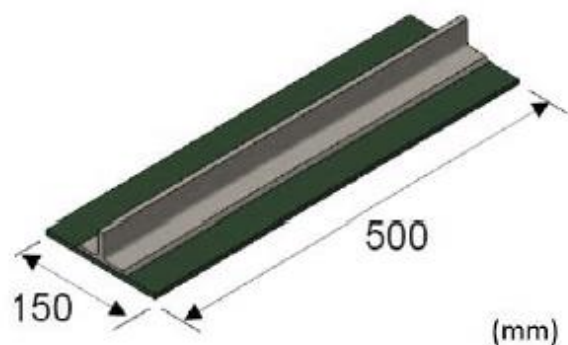


Figura 26 - Dimensões do demonstrador

Existem outras configurações disponíveis para os perfis (tais como perfis em "I" ou em "C"), dependendo da aplicação a que se destina o painel. No entanto, o perfil em "T" tem vindo a ser cada vez mais utilizado por apresentar elevada rigidez e resistência específicas (Jain, 2009).

Para efeitos de simplificação, os dados apresentados na presente secção consideram apenas as dimensões relativas à base do demonstrador. Desta forma, é considerada uma unidade funcional com 500mm de comprimento, 150mm de largura e 4mm de espessura.

Para a produção do demonstrador apresentado, são analisados os quatro processos de fabrico descritos na secção 5.2 sob a forma de cenários. Cada um dos cenários considerados envolve diferentes matérias-primas, com diferentes propriedades, que serão utilizadas em diferentes proporções. As quantidades necessárias para a produção de um demonstrador, encontram-se representadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Lista de quantidades de matérias-primas necessárias

Processo de Fabrico (Cenário)	Matérias-Primas Utilizadas	Quantidade Necessária
A	Prepreg HexPly M21	1,63 m ²
B	Reforço de Fibras de Carbono Hitape AS7	3,19 m ²
	Resina Epóxi HexFlow RTM6-2	0,14 kg
C	Prepreg (OOA) HexPly M56	1,55 m ²
D	Prepreg Termoplástico APC-2-PEEK	0,40 kg

Para a determinação das quantidades necessárias de pré-impregnados termoendurecíveis (correspondentes aos cenários A e C), foi considerada a espessura de uma camada de material (apresentadas nas fichas técnicas respetivas, disponibilizadas no *website* do fornecedor) e estimado o número de camadas necessárias para obter a espessura final da unidade funcional. Todos os valores assumidos nos cálculos efetuados encontram-se representados no Anexo A, onde se estima para os cenários A, B, C e D, um número de camadas de material de 22, 21, 30 e 25 camadas, respetivamente.

Com base na área da unidade funcional, foram posteriormente calculadas as quantidades necessárias (efetivas, i.e., sem considerar desperdícios de material) em M2 de rolo de *prepreg*. Para o cenário B, a quantidade de fibras secas necessárias foi calculada através de um processo semelhante, sendo considerado um teor de fibras, em volume, de 58%, conforme recomendado pelo fabricante. Com base nesta relação o entre fibras secas e resina epóxi e considerando o valor de densidade mássica da resina, é

apresentada a quantidade necessária para a produção, em quilogramas. Para o cenário D, foi igualmente utilizado o valor de densidade mássica apresentado na respetiva ficha técnica de forma a obter a quantidade final, em quilogramas.

Cada um dos cenários identificados considera a existência de um determinado conjunto de etapas, realizadas de forma sequencial, que tem início com a aquisição das matérias primas e que termina com a obtenção do compósito final. As etapas identificadas em cada cenário, detalhadas na secção 5.1.3, permitem o mapeamento dos diferentes processos de fabrico e facilitam a sua compreensão. No entanto, a utilização de diferentes materiais (com diferentes propriedades e características) e processos de produção distintos, conduzem a diferentes tempos de processamento e custos operacionais, devido à alocação de recursos e tecnologias específicas. Como tal, e de forma a quantificar as principais diferenças identificadas, torna-se relevante desenvolver uma análise estruturada e integrada, onde as principais etapas se encontram agrupadas em quatro fases comuns fundamentais, conforme representado na Figura 27.

Para efeitos de simplificação da complexidade envolvida, assume-se desprezável o tempo de transição entre etapas (associado a tempos de espera ou à transferência do componente para uma localização específica da fábrica). Define-se ainda uma duração nula para a primeira etapa de cada um dos processos (relativa à obtenção de matérias-primas).

Dada a inexistência de dados disponibilizados pela Embraer relativos à duração das principais etapas (na medida em que os processos OOA considerados não são atualmente desenvolvidos nas suas fábricas), consideram-se tempos experimentais, obtidos em ambiente laboratorial, para a produção de uma unidade isolada, e recorre-se às fichas técnicas disponibilizadas pelos fornecedores de matérias-primas. Cada uma das operações incluídas nas diferentes fases é desenvolvida por um recurso ou tem uma (ou mais) tecnologia alocada, durante tempos de processamento estimados.

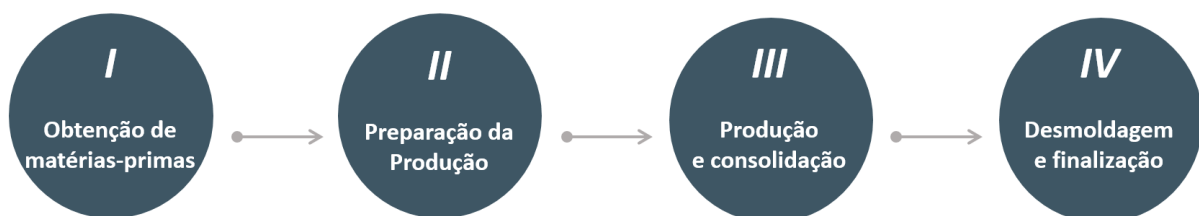


Figura 27 - Fases de processamento de um material compósito

Fase 1 – Obtenção de matérias-primas

Numa primeira fase, ocorre a obtenção de matérias primas necessárias para a produção. Os materiais armazenados utilizados nos cenários A e C encontram-se congelados a uma temperatura de -18°C (dada a sua condição de pré-impregnados termoendurecíveis) e, como tal, são previamente colocados a descongelar (ou em alguns casos aquecidos, se se pretender acelerar essa etapa), de forma a que possam iniciar o processo. Todos os restantes materiais, relativos aos cenários B e D, encontram-se à temperatura ambiente, não necessitando de qualquer operação prévia.

Fase 2 – Preparação da produção

A fase de preparação da produção incorpora as ações prévias à produção do compósito propriamente dita - onde ocorre a cura e a consolidação do material. A duração das principais atividades consideradas, bem como os respetivos recursos e tecnologias alocados, encontram-se representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Duração das principais atividades envolvidas na preparação da produção

Cenário	Principais Atividades Consideradas	Duração Estimada	Recurso/Tecnologia Alocado
A	Corte das camadas de <i>prepreg</i> ;	01 h 01 min	Operador
	Laminagem e preparação do molde;		
	Preparação do saco de vácuo.		
B	Mistura dos componentes da resina.	00 h 30 min	Forno
	Corte das camadas de tecido de fibra;	01 h 50 min	Operador
	Preparação da infusão;		
	Preparação do saco de vácuo.		
Ciclos de Compactação (a vácuo).	00 h 50 min	Vácuo	
C	Corte das camadas de <i>prepreg</i> ;	01 h 10 min	Operador
	Laminagem e preparação do molde;		
	Preparação do saco de vácuo.		
D	Ciclos de Compactação (a vácuo).	00 h 50 min	Vácuo
	Corte das camadas de <i>prepreg</i> ;	04 h 15 min	Operador
Laminagem e preparação do molde.			

Os tempos de processamento das atividades de corte de *prepreg* e tecidos, laminagem e preparação da infusão, são obtidos com base na operação laboratorial. A sua duração é dependente do número de camadas de material necessárias para atingir a espessura de compósito final pretendida (estimadas no Anexo A). Como tal, para a determinação dos tempos relativos a essas etapas é considerado o tempo de preparação médio associado a uma única camada de material, ao qual é adicionado um tempo médio variável, de acordo com o número de camadas de cada uma das matérias-primas envolvidas. Para os cenários A, B e C, considera-se que a adição de cada camada de material extra apresenta um impacto de um minuto na duração média da respetiva etapa. Para o cenário D esse tempo é muito superior, onde o rigor acrescido exigido no alinhamento exato das diversas camadas de *prepreg* conduz a um aumento médio na duração da etapa de dez minutos, por cada camada extra adicionada. No entanto, importa referir as hipóteses assumidas representam apenas estimativas e que, naturalmente dependerão da perícia do operador. De facto, a grande maioria das atividades consideradas nesta fase de preparação da produção são desempenhadas de forma manual, por um operador especializado.

Dos valores apresentados, destacam-se ainda os ciclos de compactação realizados nos cenários B e C, cujo tempo de processamento é estimado com base no tempo médio de trinta segundos por ciclo realizado e no número de ciclos considerado adequado – 100 ciclos, nos cenários referidos.

Fase 3 – Produção e consolidação

Os tempos de processamento associados às principais atividades envolvidas na produção e consolidação dos compósitos bem como os recursos e tecnologias alocados, encontram-se representados na Tabela 7. De facto, é na fase que se verificam as principais diferenças entre os cenários considerados, nomeadamente ao nível dos recursos e tecnologias alocados. Algumas das atividades consideradas nos cenários A, B e C apresentam simultaneamente duas tecnologias associadas, sendo o vácuo uma delas. Verifica-se nessas atividades, a cura dos materiais em forno ou autoclave durante um período no qual a peça se encontra também submetida a vácuo. Os principais tempos identificados variam não só de acordo com as especificidades de cada um dos materiais selecionados (a escolha de outras matérias primas, ainda que do mesmo tipo, poderiam apresentar tempos de processamento distintos), como também de acordo com as características das tecnologias utilizadas no seu processamento (i.e., tamanho da tecnologia – autoclave, forno -, potência, temperatura máxima, entre outros). As informações relativas aos estágios de cura e prensagem a quente, e respetivas temperaturas de atuação são identificadas com base em informação disponível pelos fornecedores, apresentada nos Anexos B, C, D e E. No presente estudo de caso, são consideradas tecnologias de laboratório, com capacidade de produção de compósitos com as dimensões identificadas, sendo que, num contexto industrial de larga escala, alguns dos tempos identificados - nomeadamente de aquecimento e arrefecimento das tecnologias - podem revelar-se inferiores. Considera-se, para efeitos de cálculo, uma taxa de aquecimento quer do autoclave, quer do forno, igual a 1,5°C/minuto e uma taxa de arrefecimento correspondente de 2°C/minuto (valores laboratoriais do projeto IAMAT e que satisfazem as condições de aquecimento e arrefecimento recomendadas pelo fornecedor).

Tabela 7 - Duração das principais atividades envolvidas na produção e consolidação

Cenário	Principais Atividades Consideradas	Duração estimada	Recurso/Tecnologia Alocado
A	Aumento da temperatura do autoclave até 180°C.	01 h 25 min	Vácuo e Autoclave
	Estágio de cura realizado a 180°C.	03 h 00 min	
	Arrefecimento no forno até à temperatura ambiente (20°C).	01 h 20 min	
B	Aquecimento da resina (80°C) e do molde (120°C).	00 h 53 min	Forno
	Processo de infusão.	00 h 40 min	Vácuo
	Aquecimento do material no forno (de 80°C) até 180°C.	01 h 05 min	Vácuo e Forno
	Estágio de cura realizado a 180°C.	02 h 00 min	
	Arrefecimento no forno até à temperatura ambiente (20°C).	01 h 10 min	
C	Aumento da temperatura do forno até 110°C.	01 h 00 min	Vácuo e Forno
	Primeiro estágio de cura realizado a 110°C.	01 h 00 min	
	Aumento da temperatura do forno até 180°C.	00 h 45 min	
	Segundo estágio de cura realizado a 180°C.	03 h 00 min	
	Arrefecimento no forno (até atingir os 40°C).	01 h 20 min	
D	Pré-aquecimento em forno.	01 h 05 min	Forno
	Prensagem a quente (a 390°C).	00 h 10 min	Prensa
	Aquecimento e arrefecimento da prensa.	00 h 20 min	

Fase 4 – Desmoldagem e Finalização

Após a fase de cura e consolidação, são obtidos os compósitos finais. Terminado o arrefecimento, os materiais são removidos da respetiva tecnologia utilizada para o seu processamento (autoclave, forno, prensa), verificando-se a desmoldagem, e a remoção de todos os tecidos técnicos utilizados na produção (como membranas, materiais do saco de vácuo, entre outros) que não são reaproveitados. Esta fase é desenvolvida por um operador especializado, de forma semelhante em todos os processos considerados, e considera-se uma duração média de cinco minutos. Posteriormente, podem ainda ser realizadas operações de acabamento superficial, se se verificarem necessárias.

Para efeitos de comparação dos custos associados aos diferentes processos nas fases supramencionadas, e dada a ausência de dados em ambiente de produção industrial em larga escala, consideram-se como viáveis e admissíveis os preços praticados em laboratório, obtidos no âmbito do projeto IAMAT, em processos de produção para venda ao consumidor final, alocados aos diferentes recursos e tecnologias associadas, conforme representado na Tabela 8.

Tabela 8 - Custos operacionais

	Custo (€/hora)
Técnico especialista	25
Autoclave	70
Forno	20
Prensa	90
Vácuo	5

5.3.4. Caracterização do Transporte

Conforme ilustrado previamente, na Figura 25, a definição do transporte de matérias-primas encontra-se dependente da localização do fornecedor selecionado.

Para as matérias-primas fornecidas pela Hexcel, cujos envios são realizados a partir de Dagneux, é utilizado apenas o camião, enquanto meio de transporte unimodal. No entanto, o camião considerado poderá ser ou não refrigerados, dependendo das condições de temperatura exigidas pelas diferentes matérias-primas (apresentadas previamente na Tabela 4). As matérias-primas M1 e M4 necessitam de transporte sob condições de refrigeração, pelo que são transportadas em camiões refrigerados, enquanto as matérias M2 e M3 não necessitam de condições especiais de transporte, e chegam a Évora, à fábrica da Embraer Portugal, por camião não refrigerado.











A matéria-prima fornecida pela Cytec, M5, apresenta um fluxo intercontinental, pelo que considera o transporte intermodal. Esta matéria não necessita de condições especiais de transporte, sendo transportada à temperatura ambiente. Proveniente da Califórnia, chega até à zona costeira do continente por camião não refrigerado, e atravessa o Oceano Atlântico de navio. Uma vez no porto de Sines, é novamente transferida para um camião e transportada até Évora.




Após o processamento das matérias-primas, na Embraer Portugal, é obtido o componente compósito, que necessita de ser enviado para a fábrica do OEM, em São José de Campos, de forma a ser incorporado na

produção final de um avião. Transportado até ao porto de Sines por camião (não necessita de refrigeração), segue por navio até à costa brasileira, atingindo o seu destino final através da via terrestre, novamente através de camião.

Para a determinação das distâncias entre as diferentes entidades da cadeia de abastecimento, foram selecionadas as distâncias por estrada, com base nos percursos mais curtos sugeridos pela aplicação *GoogleMaps*. As distâncias entre portos foram obtidas através do portal *Ports.com*, que considera as principais rotas mundiais entre portos. Na Tabela 9 são apresentadas as distâncias correspondentes a cada um dos itinerários envolvidos na obtenção de matérias-primas e no envio do produto final. É ainda associado o tempo de entrega (*lead time*) respetivo, que envolve todo o período compreendido entre o instante de realização da encomenda e a chegada da matéria-prima ao seu destino final, obtido através de valores indicativos, não contratuais, fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 9 - Distância entre entidades e respetivo tempo de transporte

Cenário	Matéria Envolvida	Meio Trans.	Localizações		Distância (km)	Tempo Entrega
			(origem	→ destino)		
A	M1		Dagneux, França	→ Évora, Portugal	1655	12 semanas
B	M2		Dagneux, França	→ Évora, Portugal	1655	12 semanas
	M3		Dagneux, França	→ Évora, Portugal	1655	12 semanas
C	M4		Dagneux, França	→ Évora, Portugal	1655	16 semanas
D	M5		Anaheim, Califórnia	→ Porto Long Beach, Califórnia	52	
			Porto Long Beach, Califórnia	→ Porto de Sines, Portugal	13210	18 semanas
			Porto de Sines, Portugal	→ Évora, Portugal	134	
-	prod. final		Évora, Portugal	→ Porto de Sines, Portugal	134	(dependente do nível de procura do OEM)
			Porto de Sines, Portugal	→ Porto de Itaguaí, Brasil	9784	
			Porto de Itaguaí, Brasil	→ São José dos Campos, Brasil	306	

Legenda:  Camião refrigerado;  Camião;  Navio.

Toda a frota considerada e utilizada no transporte das matérias-primas e do produto final é subcontratada. Enquanto prática da indústria, os custos associados ao transporte encontram-se já incluídos no preço unitário da matéria-prima. No entanto, para as matérias-primas transportadas sob refrigeração é realizado o controlo e registo da temperatura através de um equipamento eletrónico. Este dispositivo acompanha a matéria-prima durante todo o percurso realizado e regista em intervalos de tempo regulares a temperatura de forma gráfica, permitindo perceber e comprovar as condições de temperatura a que o material se encontra sujeito. Como tal, para as matérias-primas que revelam estas características (M1 e M4, respetivamente) acresce a cada encomenda realizada um custo fixo de 60€ (relativo ao dispositivo eletrónico de registo de temperatura) e considera-se, enquanto simplificação, um custo variável de $1,15 \times 10^{-3}$ €, por cada metro quadrado de matéria-prima transportada ao longo de um quilómetro.

Apesar do valor unitário reduzido, importa considerar as quantidades elevadas de matéria-prima transportada, bem com as longas distâncias percorridas.

5.3.5. Caracterização Ambiental

Existem na literatura diversas metodologias disponíveis para a avaliação dos impactos ambientais das cadeias de abastecimento. A metodologia *Life-Cycle Assessment* (LCA) é atualmente a mais utilizada e identificada pela Comissão Europeia como a melhor *framework* para a avaliação de potenciais impactos ambientais de produtos e processos (Comissão Europeia, 2003) (Ness et al., 2007). A LCA permite a avaliação holística dos impactos associados a todas as etapas do ciclo de vida do produto, desde a extração de matérias primas à produção, consumo, reciclagem e disposição final (ISO, 2006) (Bojarski et al., 2009). Avalia, assim, inputs, outputs, bem como os potenciais impactos de um determinado sistema de produto ao longo do seu ciclo de produção, ciclo de vida e todas as decisões relacionadas com a cadeia de abastecimento em que se insere. Existem vários métodos LCA, entre os quais se destaca o ReCiPe. Identificado atualmente como o método mais desenvolvido (Comissão Europeia, 2011) é também o método aplicado nos trabalhos de Mota et al. (2015; 2017), onde se verifica a obtenção de resultados conclusivos e relevantes no apoio à tomada de decisão.

A metodologia ReCiPe revela-se interessante e adequada para explorar a avaliação dos impactos ambientais associados à introdução de novos materiais compósitos e respetivas tecnologias de fabrico na cadeia de abastecimento aeronáutica. No entanto, a dificuldade em obter dados representativos de determinadas categorias, e o facto das bases de dados consideradas por estas metodologias (como por exemplo, a base de dados *Ecoinvent*) não conterem ainda qualquer informação associada à obtenção de matérias-primas e produção de materiais compósitos, condiciona a atual aplicabilidade desta ferramenta. Como tal, e dada a impossibilidade de implementação de uma metodologia integral de LCA, é apresentada uma Avaliação Parcial de Fatores Ambientais, considerando apenas as emissões de CO_2 . De facto, e de acordo com Eskandarpour et al. (2015), a consciência acerca de preocupações ambientais na maioria das empresas é geralmente associada a um processo gradual, onde a avaliação de apenas um subconjunto de fatores ambientais deve representar um passo intermédio para a futura integração total dos impactos considerados.

O âmbito definido na presente avaliação (i.e., as fronteiras consideradas na cadeia de abastecimento) é denominado *gate-to-gate*. De acordo com a literatura, este âmbito considera apenas níveis intermédios da cadeia de abastecimento relativos à produção ou transformação e entrega de produtos, não contemplando na análise (i.e., deixando de fora da fronteira de análise) a extração das matérias-primas, bem como a disposição final dos produtos em fim de vida (Eskandarpour et al., 2015). A Figura 24, apresentada anteriormente, representa esta definição, onde é considerado o transporte de matérias-primas do fornecedor para a fábrica da Embraer Portugal, o processamento dessas mesmas matérias, no local, para a obtenção de componentes compósitos e o transporte dos compósitos finais para as instalações do OEM.

Apesar de encontrar focada apenas em apenas um determinado segmento da cadeia de abastecimento, a abordagem *gate-to-gate* poderá ser complementada e interligada posteriormente a outros módulos *gate-to-gate*, de forma a representar toda a cadeia (denominada avaliação *cradle-to-gate*) (González et al., 2000).

A unidade funcional considerada para estas fronteiras do sistema é uma unidade de produto final - um demonstrador - com as dimensões consideradas na Figura 26 e transformado/produzido de diferentes formas, a partir das quantidades das matérias-primas consideradas em cada um dos cenários.

Com base nas fronteiras definidas e na unidade funcional em estudo, são abordados de seguida os principais impactos ambientais relativos às categorias “Transporte” e “Produção do componente final”, para os quatro cenários em estudo. No entanto, verifica-se, de acordo com o mapeamento dos diferentes cenários, desenvolvido na secção 5.1, que enquanto nos cenários A,C e D as matérias primas já se encontram pré-impregnadas (fase de impregnação foi realizada previamente, antes da aquisição da matéria-prima, situando-se, portanto, fora da fronteira de análise), o processo mapeado no cenário B contempla a etapa de impregnação (através da infusão). De facto, as matérias primas utilizadas nos diferentes processos considerados, encontram-se em diferentes estágios do ciclo de vida, incorporando, como tal, impactos ambientais distintos. Neste sentido, e de forma a tornar comparáveis todas as matérias-primas dos diferentes cenários, através da análise das mesmas etapas, são também consideradas as emissões de CO_2 equivalentes, associados à produção e impregnação dessas matérias-primas (fibras de carbono e resinas epóxi), abordadas na categoria “Produção de matérias-primas”. Para a conversão do consumo energético (em kWh) para emissões de CO_2 equivalentes (kg CO_2 eq), é utilizado o fator de conversão 0,537, conforme indicado no relatório de fatores de conversão de gases de efeito de estufa, disponibilizado pelo Departamento Ambiental do Governo do Reino Unido (DEFRA UK, 2017).

Produção de Matérias-Primas

O inventário de dados (*Life Cycle Inventory* – LCI) associados à produção das fibras de carbono e da resina não se encontram atualmente representado em qualquer base de dados, utilizadas pelas metodologias LCA. Como tal, e de forma a incluir as respetivas emissões, utilizam-se os valores obtidos no trabalho de Suzuki e Takahashi (2005), com aplicação à produção em massa na indústria automóvel. Os autores consideram que os consumos energéticos e ambientais associados à produção fibras de carbono equivalem a 286 MJ/kg produzido, enquanto a produção de um quilograma de resina epóxi apresenta um consumo de 76 MJ. Com base nas quantidades médias de fibras de carbono e resina consideradas para o fabrico de uma unidade de componente final no (0,30 kg e 0,14 kg, respetivamente), e utilizando a taxa de conversão de MJ para kWh (igual a 0,2778), obtém-se um consumo energético de aproximadamente 23,83 kWh para a produção das fibras de carbono e 2,96 kWh para a produção de resina epóxi. Para efeitos de simplificação, consideram-se estes valores em todos os cenários em estudo, desprezando-se desta forma as diferenças nos impactos ambientais associadas à utilização de fibras de carbono e resinas com diferentes características e propriedades.

Ainda de acordo com Suzuki e Takahashi (2005), é possível avaliar o impacto ambiental relativo à etapa de impregnação. No estudo desenvolvido, conclui-se acerca de um consumo energético de 40,0 MJ/kg para a produção do *prepreg* (associado aos cenários A, C e D) e apenas 10,2 MJ/kg para a impregnação através do processo de infusão (conforme realizada no cenário B). Com base nas quantidades identificadas de cada uma das matérias-primas necessárias para a produção de uma unidade de produto final (representadas na Tabela 5), são realizadas as conversões necessárias das suas unidades de medida (a partir dos valores de massa nominal - g/m^2 - disponibilizados pelo fornecedor, e da relação entre MJ/kWh) de forma a estimar o impacto ambiental final da etapa, para todos os cenários (Tabela 10).

Tabela 10 - Consumo energético da etapa de produção do prepreg vs infusão

Cenário	Matérias-Primas	Quantidade Necessária	Massa nominal	Massa equivalente	Consumo energético unitário	Consumo Energético
A	M1	1,63 m ²	294 g/m ²	0,479 kg	11,12 kWh/kg	5,338 kWh
B	M2	3,19 m ²	194 g/m ²	0,619 kg	2,84 kWh/kg	1,754 kWh
	M3	0,14 kg	-	0,140 kg		
C	M4	1,55 m ²	206 g/m ²	0,319 kg	11,12 kWh/kg	3,547 kWh
D	M5	0,40 kg	-	0,400 kg	11,12 kWh/kg	4,448 kWh

Produção do Componente Final

Para a avaliação dos impactos ambientais associados à produção do componente final, são apenas consideradas no presente estudo as etapas que envolvem as tecnologias de vácuo, autoclave, forno e prensa, para a realização das etapas de vácuo, compactação, cura ou consolidação.

A análise dos consumos energéticos baseia-se na utilização de equipamentos laboratoriais, adequados à produção do demonstrador, de pequenas dimensões. Assim, tem-se: autoclave com 0,75 m³ de capacidade e 27 kW de potência; forno com 0,79 m³ de capacidade e 4,8 kW de potência; e uma prensa para aplicações limite de área 250mm x 250mm, capacidade de aquecimento superior à temperatura de termoformação do *prepreg* PEEK considerado, e 3 kW de potência.

Considera-se ainda, no funcionamento do autoclave, a utilização de 60% da sua potência durante as fases de aquecimento (pré-cura), e de 20% da mesma durante a fase de cura, conforme indicado no trabalho Scelsi et al. (2011). Dada a inexistência de informação relativa a estas fases aquando da utilização de forno ou prensa, tem-se como pressuposto uma taxa percentual constante de 60% potência da tecnologia, durante todo o seu período de utilização. Para o cálculo dos consumos energéticos totais associados a cada um dos cenários, são consideradas as atividades de compactação, aquecimento e cura (ou consolidação) identificadas previamente na Tabela 6 e Tabela 7, com as respetivas durações associadas. É também considerado o consumo energético nas atividades que envolvem a presença de vácuo, sendo este consumo exclusivamente associado à bomba de vácuo, para a qual se estima uma potência aproximada de 1 kW, de acordo com os dados do Instituto de Investigação Swerea IVF (Roos e Szpieg, 2012). Os resultados são apresentados no Anexo F.

Transporte

A avaliação dos impactos ambientais associados ao transporte de matérias-primas e do produto final é incluída no presente trabalho. São consideradas as quantidades de matérias-primas necessárias para a produção de um demonstrador, através da sua massa equivalente, estimada na Tabela 10, e as distâncias percorridas entre as diferentes entidades, presentes na Tabela 9. Para a avaliação do desempenho ambiental da atividade de transporte consideram-se as emissões disponíveis na base de dados *SimaPro Ecoinvent* versão 8.2.3.0., utilizando a metodologia *ReCiPe Midpoints (H)*, relativas à categoria de impacto "Climate Change", em kg de CO₂ eq (por km).

Para o transporte efetuado por camião refrigerado são selecionadas oito referências distintas - que consideram diferentes tipos de materiais utilizados para refrigerar (refrigerante R134a ou refrigerante líquido de dióxido de carbono), opções de congelamento ou arrefecimento, e ainda diferentes capacidades

do camião (3,5-7,5 ton ou 7,5-16 ton). Uma vez que a informação relativa a estas decisões não se encontra disponível, é considerado o valor médio de emissões de CO_2 das oito opções apresentadas, de $3,737 \cdot 10^{-4}$ kg de CO_2 eq (por km). Os valores detalhados para cada uma das referências selecionadas encontram-se no Anexo G. Para o transporte realizado por camião são selecionadas quatro referências que diferem na capacidade de transporte disponível da viatura (3,5-7,5 ton, 7,5-16 ton, 16-32 ton, >32 ton). Considerando o mesmo pressuposto assumido anteriormente, é apresentado o valor médio de emissões de CO_2 de $2,065 \cdot 10^{-4}$ kg de CO_2 eq (por km), conforme detalhado no Anexo H. Relativamente ao transporte por navio foram de igual forma selecionada quatro referências (detalhadas no Anexo I), que envolvem opções transoceânicas ou *inland*, *ship* ou *tanker*. O valor médio obtido é de $2,162 \cdot 10^{-5}$ kg de CO_2 eq (por km). No anexo J, são identificadas as emissões de CO_2 da atividade de transporte da cadeia de abastecimento.

As informações recolhidas na presente secção relativas à caracterização ambiental dos cenários em estudo encontram-se representadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Caracterização ambiental dos cenários em estudo

Cenário	Produção de matérias-primas	Transporte de matérias-primas	Produção do compósito final	Transporte do compósito final
A	fibras: 23,83 kWh resina: 2,96 kWh <i>prepreg</i> : 5,338 kWh	massa: 0,48 kg camião refr: 1655 km	autoclave: 48,53 kWh vácuo: 9,08 kWh	massa: 0,40 kg camião: 134 km navio: 9784 km camião: 306 km
	17,253 kg CO_2 eq	0,297 kg CO_2 eq	30,937 kg CO_2 eq	0,1210 kg CO_2 eq
B	fibras: 23,83 kWh resina: 2,96 kWh infusão: 1,75 kWh	massa: 0,76 kg camião: 1655 km	forno: 12,85 kWh vácuo: 7,13 kWh	massa: 0,40 kg camião: 134 km navio: 9784 km camião: 306 km
	15,326 kg CO_2 eq	0,212 kg CO_2 eq	10,729 kg CO_2 eq	0,1210 kg CO_2 eq
C	fibras: 23,83 kWh resina: 2,96 kWh <i>prepreg</i> : 3,547 kWh	massa: 0,32 kg camião refr: 1655 km	forno: 16,56 kWh vácuo: 7,91 kWh	massa: 0,40 kg camião: 134 km navio: 9784 km camião: 306 km
	16,291 kg CO_2 eq	0,198 kg CO_2 eq	13,140 kg CO_2 eq	0,1210 kg CO_2 eq
D	fibras: 23,83 kWh resina: 2,96 kWh <i>prepreg</i> : 4,448 kWh	massa: 0,40 kg camião refr: 52 km navio: 13210 km camião refr: 134 km	forno: 3,11 kWh prensa: 0,91 kWh	massa: 0,40 kg camião: 134 km navio: 9784 km camião: 306 km
	16,775 kg CO_2 eq	0,129 kg CO_2 eq	2,159 kg CO_2 eq	0,1210 kg CO_2 eq

Os dados analisados no presente capítulo, apresentam-se como uma base de informações relevantes que permite a caracterização dos principais aspetos relativos à introdução de novos materiais compósitos na cadeia de abastecimento aeronáutica, nomeadamente: estrutura da cadeia de abastecimento, fornecedores e matérias-primas envolvidas, produto em estudo e processos de fabrico associados à sua produção, transporte e impactos ambientais. Ainda que diversas simplificações e pressupostos baseados num ambiente laboratorial tenham sido considerados, torna-se possível analisar os principais resultados obtidos, bem como, discutir os principais fatores associados à sua aplicação num contexto real.

6. Resultados e Discussão dos Cenários em Estudo

No presente capítulo pretendem-se analisar e discutir os principais resultados obtidos no processo de recolha e de análise de dados realizada na secção 5.3. O capítulo encontra-se organizado em duas secções. Na secção 6.1 são apresentados os principais resultados do estudo realizado, através da identificação da duração global dos processos de produção e da avaliação económica e ambiental dos diferentes cenários. Na secção 6.2 os resultados obtidos são discutidos e os cenários em estudo são comparados através de uma abordagem holística, onde são apresentadas recomendações para o sucesso da introdução dos respetivos materiais compósitos e tecnologias de fabrico na cadeia de abastecimento aeronáutica.

6.1. Resultados

6.1.1. Avaliação Económica

Para a avaliação económica dos cenários em estudo foram determinados os custos associados às quatro fases de processamento consideradas (referidas previamente na Figura 27). Para o custeio da fase “obtenção de matérias primas”, foram utilizadas as quantidades de matérias-primas estimadas para a produção de uma unidade de produto compósito final bem como custos unitários associados à sua aquisição. Para as restantes fases, nomeadamente “preparação da produção”, “produção e consolidação”, e “desmoldagem e finalização”, foram considerados os recursos e tecnologias alocados às principais atividades envolvidas (representadas na Tabela 6 e na Tabela 7), o seu custo horário (Tabela 8) e as respetivas durações. O custo obtido para cada uma das atividades encontra-se detalhado no Anexo K.

Com base nos valores obtidos torna-se possível avaliar a nível económico os diferentes cenários, conforme representado na Figura 28 (valores em euros). Representam-se os principais custos estimados para a produção de um demonstrador, enquanto componente compósito, com as representações dos valores associados às matérias-primas, mão de obra (operador, i.e., técnico especializado) e tecnologias utilizadas para o processamento (autoclave, forno, vácuo ou prensa) em cada um dos cenários em estudo.

O cenário A, correspondente ao processo de produção de compósitos de matriz termoendurecível de cura em autoclave, representa o cenário atual da Embraer, apresentando-se, portanto, como cenário base de comparação com os restantes cenários. O custo global associado a este cenário é o mais elevado, com um total de 529€. Por outro lado, o cenário D, representativo do processo de termoformação de matriz termoplástica por prensagem a quente, apresenta o menor custo, com um custo inferior em aproximadamente 50%, no total de 259€. Relativamente aos restantes dois cenários, de processos de formação de compósitos de matriz termoendurecível, tem-se um custo global de 321€ para o cenário B (processo de infusão de resina assistido por vácuo) e 315€ para o cenário C (processo de *vacuum bag only*). Estes cenários apresentam, assim, um custo global semelhante e que representa uma redução de aproximadamente 40% do valor apresentado pelo cenário A.

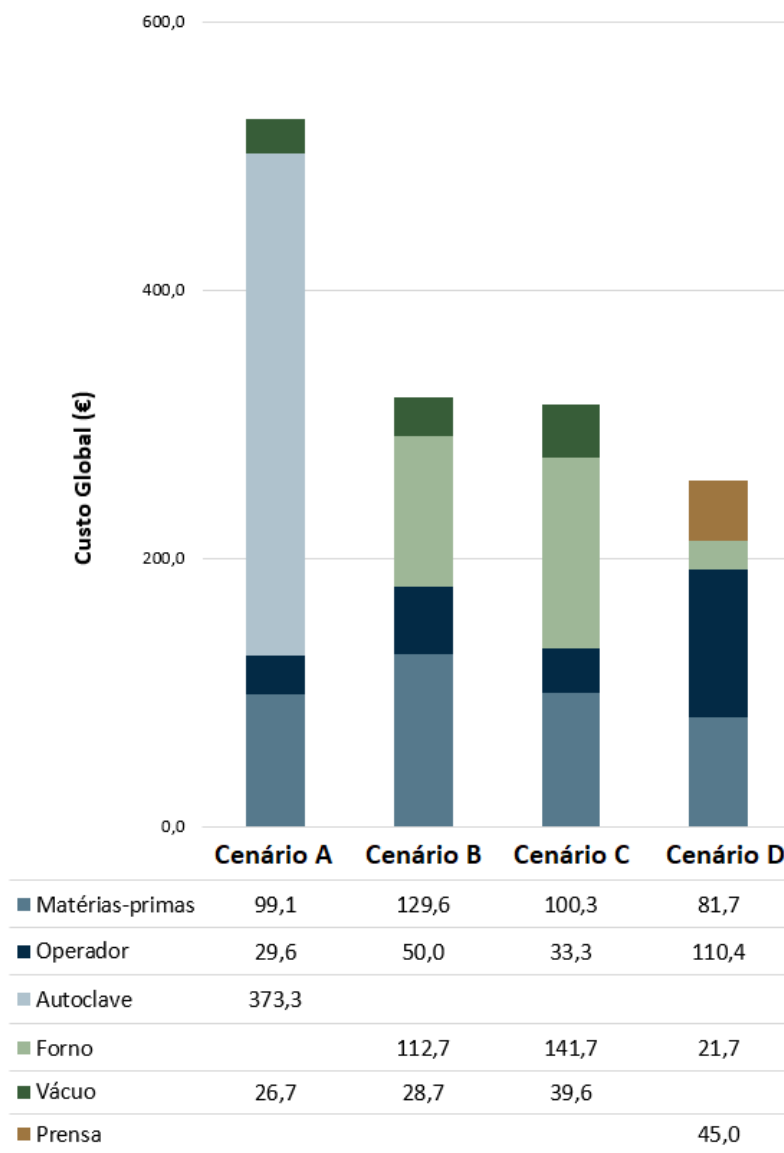


Figura 28 - Custo Global Estimado para os Cenários em Estudo

Conforme esperado, os elevados custos verificados no cenário A devem-se em grande parte à utilização do autoclave. Na verdade, esta tecnologia representa 70% do custo total do processo, conforme representado na Figura 29. Em compensação, os custos de mão-de-obra verificados apresentam-se como os mais reduzidos, correspondendo a 6% do custo global.

No cenário C, os custos de mão-de-obra são idênticos ao cenário base (uma vez que as etapas desenvolvidas pelo operador são semelhantes) ainda que com uma proporção relativa superior (igual a 10%) e no cenário B são 40% mais elevados - devido necessidade de corte manual dos tecidos de fibra, à montagem de todos os equipamentos e ligações necessárias na preparação da infusão e ao respetivo tempo adicional despendido posteriormente durante a etapa de infusão. É, no entanto, no cenário D onde a intervenção humana é mais importante, com um custo associado de 110€ - justificado pela exigência de precisão na colocação e alinhamento das diferentes camadas de material (um processo demorado) – e que representa 40% nos custos totais do cenário.

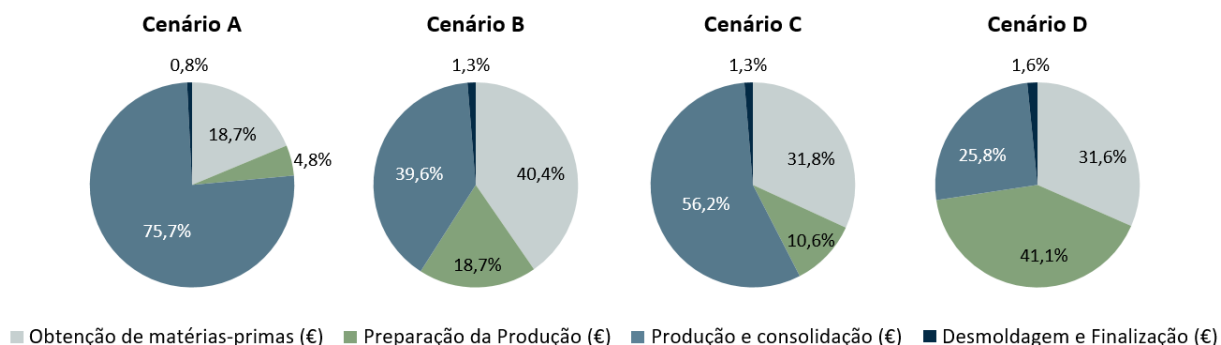


Figura 29 - Custo das principais fases associadas à produção de compósitos nos cenários em estudo

O cenário B é aquele que apresenta maiores custos com matéria-prima, com um total de 130€. Apesar das fibras secas e resina utilizadas neste cenário apresentarem um custo unitário inferior ao verificado nos *prepregs* utilizados nos restantes cenários (nos quais já ocorreu a etapa de impregnação) são necessárias quantidades relativas de matéria-prima superiores. De facto, este é também o cenário onde se verifica o maior impacto das matérias-primas no custo total: 40% dos custos associados são relativos às matérias adquiridas. No cenário C, onde os custos globais são aproximadamente iguais aos do cenário B, os custos com matérias-primas e preparação da produção são ambos inferiores em 8%, mas compensados pelos custos superiores (16%) na produção e consolidação, devido ao tempo superior de utilização do forno no estágio de cura.

O melhor desempenho ao nível económico verificado no cenário D é explicado, na sua maioria, pela natureza da matéria-prima: um *prepreg* PEEK, de matriz termoplástica, que num curto período de tempo é deformado numa prensa adquirindo a forma do compósito final, não necessitando de longos estágios de cura como os verificados nos restantes cenários, em autoclave ou forno, característicos dos compósitos termoendurecíveis. A sua fase de “produção e consolidação” assume um custo de apenas 67€, valor este 80% inferior à fase correspondente no cenário base, de cura em autoclave e assistida por vácuo.

6.1.2. Avaliação Ambiental

Para a realização da avaliação ambiental, são consideradas as emissões equivalentes de dióxido de carbono caracterizadas na secção 5.3.5, associadas à produção de fibras e resinas (enquanto matérias-primas primárias) e à produção de *prepregs* ou realização de infusão, bem como os consumos energéticos inerentes às tecnologias utilizadas durante a fase “produção e consolidação” (nomeadamente, autoclave, forno, vácuo e prensa). São ainda incluídos os impactos associados à atividade de transporte do segmento da cadeia de abastecimento considerada. Todos os valores se encontram convertidos em quilogramas de CO_2 equivalentes – de forma a facilitar a sua avaliação e comparação, e apresentados para cada um dos cenários em estudo, conforme representado na Figura 30.

O cenário A, relativo ao processo de cura em autoclave, é apresentado como o cenário de referência, com um impacto ambiental global de 48 kg de CO_2 eq. Todos os restantes cenários, relativos a processos de produção OOA, revelam melhorias ao nível do desempenho ambiental, com uma redução de 45%, 38% e 60%, correspondente aos cenários B, C e D, respetivamente.

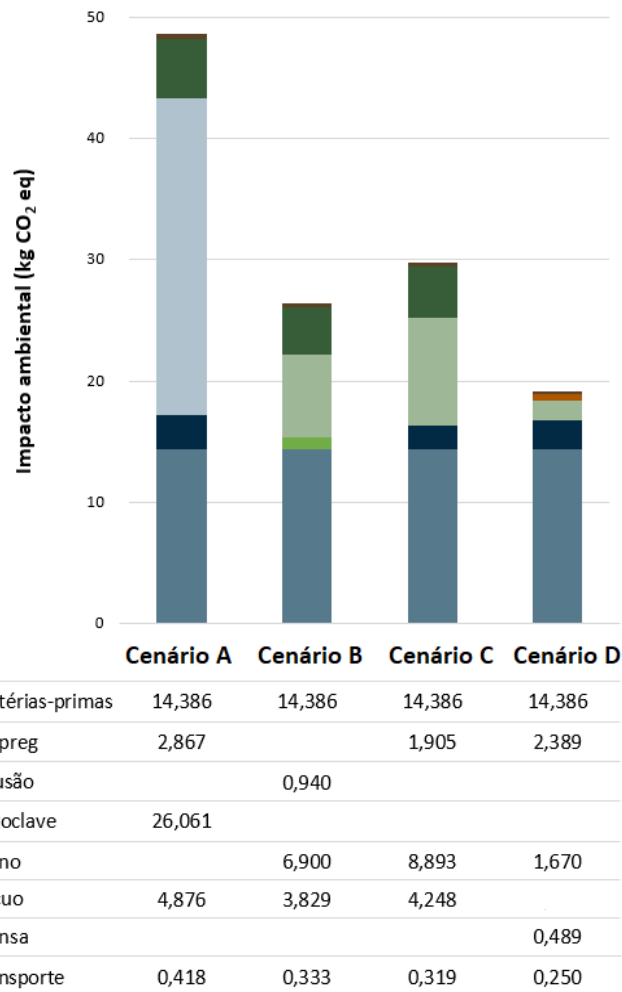


Figura 30 - Impacto Ambiental Global Estimado para os Cenários em Estudo

Apesar de se encontrar inicialmente fora da fronteira de análise, o impacto ambiental correspondente à produção das matérias-primas revela-se pertinente no contexto do problema em análise. Embora as resinas e fibras de carbono utilizadas nos diferentes cenários (no cenário B sob a forma de tecidos secos, nos restantes cenários, sob a forma de *prepreg*) apresentem características distintas (adaptadas aos processos produtivos a que se destinam) e, como tal, apresentem diferentes procedimentos de formação, foram assumidos vários pressupostos, considerando-se um mesmo impacto nesta fase para todos os cenários. Importa, como tal, referir (e ainda que futuras análises de sensibilidade a esta fase necessitem de ser desenvolvidas) o impacto ambiental muito significativo destas matérias em cada um dos processos. Conforme representado na Figura 31, o impacto considerado corresponde a 31% das emissões verificadas no cenário A, 54% das emissões totais do cenário C e 58% das emissões do cenário B. No cenário D, este mesmo impacto representa 87% das emissões globais.

A fase de infusão apenas se encontra presente no cenário B, com um impacto ambiental de 0,94 kg de CO_2 eq, correspondente a 4% das emissões totais. Nos restantes cenários, a resina foi impregnada nas fibras de carbono ainda na fase de obtenção do material *prepreg* pelo que, apesar de se encontrarem inicialmente fora da fronteira de estudo, as suas emissões são também incluídas para análise. Com base nos resultados apresentados, conclui-se que a infusão de resina realizada pela fabricante do componente compósito, apresenta um impacto inferior em 67% à etapa de *prepregging* realizada pelo fornecedor de matéria-prima do cenário A.

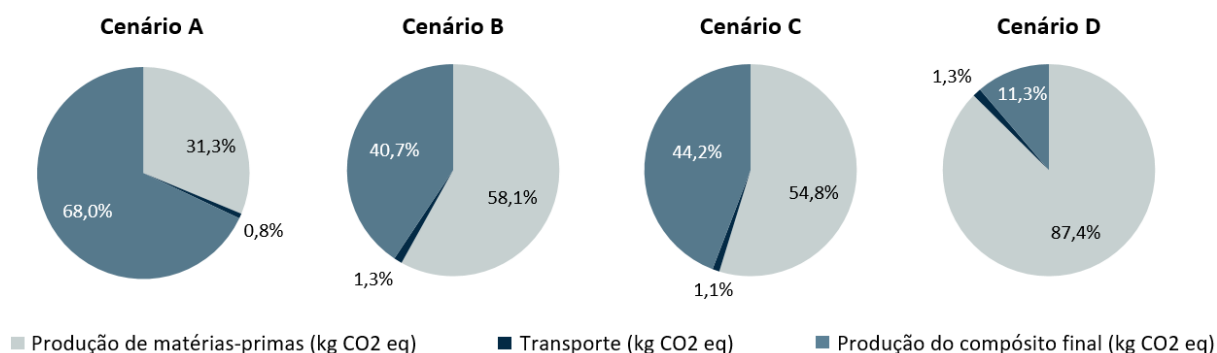


Figura 31 - Impacto ambiental das principais fases associadas à produção de compósitos nos cenários em estudo

Conforme inicialmente previsto, destaca-se o impacto ambiental relativo à utilização do autoclave para o estágio de cura no Cenário A, com o maior nível de emissões considerado: 26 kg de CO_2 eq. Esta etapa, assistida por vácuo, apresenta um total aproximado de 31,26 kg de CO_2 eq. No cenário C, onde se considera a substituição da tecnologia utilizada na cura do *prepreg*, utilizando-se dois ciclos de cura, realizados a vácuo num forno, o impacto ambiental é de 13 kg de CO_2 eq (forno + vácuo), verificando, assim, uma redução de aproximadamente 60% nos consumos energéticos. No cenário B, após a realização da etapa de infusão, ocorre a etapa de cura, também no forno e assistida por vácuo, que caracteriza a fase “produção do compósito final”, apresentada na Figura 31, e que corresponde a aproximadamente 40% do impacto ambiental global do cenário.

Contrariamente aos resultados previamente apresentados, o cenário D, que contempla a utilização de um *prepreg* termoplástico, não requer a utilização de vácuo, nem de forno ou autoclave para a realização de cura. Este material é apenas pré-aquecido no forno, durante um reduzido período de tempo (que representa 1,67 kg de CO_2 eq) e a sua consolidação ocorre seguidamente, por termoformação, numa prensa que apresenta um baixo consumo energético (comparativamente às tecnologias utilizadas nos restantes cenários). Como tal, a fase “produção do compósito final” representa neste cenário apenas 11% do seu impacto ambiental global.

O transporte de materiais (quem contém simultaneamente os impactos ambientais do transporte de matérias-primas e do produto final) contribui de forma residual para o total das emissões verificadas em cada cenário (aproximadamente 1%), apesar das diferentes entidades assumirem localizações relativamente distantes. Enquanto principal factor encontram-se as quantidades de matérias transportadas, impraticáveis numa situação real. Num contexto industrial, de aplicação em larga escala, as resinas são transportadas em bidões (com capacidades normalmente iguais ou superiores a 30 kg), as fibras de carbono e os materiais *prepreg* são transportados sob a forma de rolos (que podem atingir os 100m de comprimento), e existem ainda quantidades mínimas de encomenda exigidas pelos fornecedores – situação em que os impactos efetivos associados ao transporte de materiais poderão assumir um impacto ambiental mais significativo.

6.2. Discussão e Recomendações

Os principais indicadores analisados no decorrer do presente trabalho encontram-se resumidos na Tabela 12, onde se destaca a importância de uma análise integrada que envolva os resultados da avaliação económica e da avaliação ambiental (realizada na secção 6.1) bem como a duração global dos processos de produção considerados em cada um dos cenários em estudo.

Tabela 12 - Resultados globais de cada um dos cenários em estudo

Indicador	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D
Custo Global (euros)	528,9	321,0	314,8	258,7
Impacto Ambiental Global (kg CO₂ eq)	48,6	26,4	29,8	19,2
Duração Global (horas)	6,5	9,1	9,2	6,0

Na Figura 32 é apresentado um diagrama radar, onde os principais resultados obtidos nos diversos cenários, se encontram normalizados pelo maior valor, numa escala entre 0 e 1. A normalização em cada um dos indicadores resulta, assim, da divisão de cada valor pelo valor mais elevado correspondente, e permite a representação de forma intuitiva dos principais resultados obtidos em cada um dos cenários considerados.

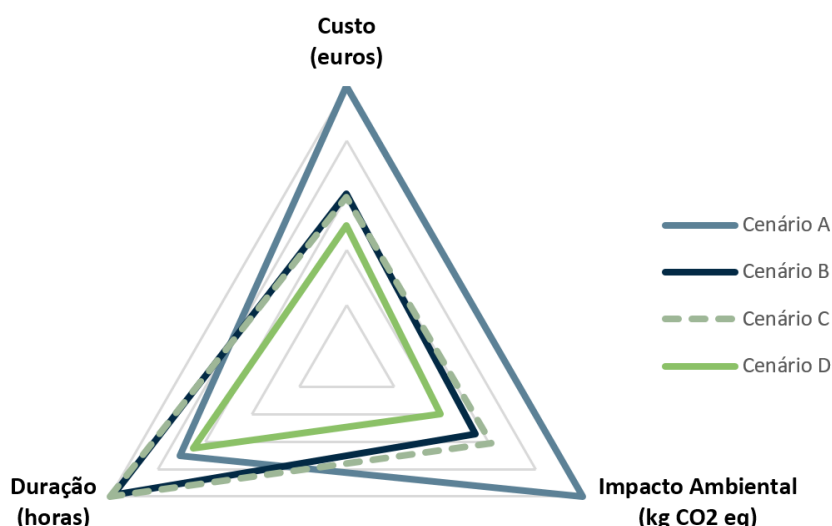


Figura 32 - Diagrama radar com resultados dos cenários normalizados

O cenário A, apresentado como o cenário de referência para a produção do demonstrador compósito, assume o custo mais elevado e também o maior impacto ambiental, associados a um processo de produção com uma duração global de 6,5h. Entre as principais causas, identifica-se a utilização do autoclave (durante um elevado período de tempo para a realização do estágio de cura), caracterizada pelo elevado custo horário bem como pelos excessivos consumos energéticos - que representam uma percentagem do impacto ambiental global superior a 50%. Todos os restantes cenários, representativos de processos de produção fora de autoclave, apresentam custos e impactos ambientais inferiores, fortalecendo a sua posição enquanto alternativas economicamente e ambientalmente viáveis.

Os cenários B e C, que consideram processos de produção de compósitos termoendurecíveis exigem a etapa de cura de duração total semelhante à verificada em autoclave, ainda que realizada em forno. No entanto, e enquanto processos OOA, necessitam de um maior período de preparação da produção, no qual se

verificam operações específicas desempenhadas manualmente e ciclos de compactação das diversas camadas de material, desenvolvidos para colmatar a ausência de pressão característica do autoclave. Como tal, estes processos apresentam uma duração global 40% superior à do cenário de referência - que num contexto de produção industrial, perante níveis de procura elevados poderá ser considerada excessiva.

Com base nos resultados obtidos, o Cenário D é aquele que revela o melhor desempenho global, uma vez que além dos custos e impactos ambientais, com reduções respetivas na ordem dos 50% e 60% (comparativamente ao cenário A), apresenta ainda uma duração global do processo inferior em aproximadamente 8% sendo, como tal, apresentado como a melhor alternativa para os indicadores selecionados.

Importa, no entanto, referir que grande parte dos dados considerados para análise foram obtidos com base em estimativas ou recolhidos na literatura, e aplicados num ambiente laboratorial, pelo que a sua aplicação a um nível industrial poderá conduzir a variações nos resultados. Como tal, os resultados apresentados devem ser validados pelos fabricantes e fornecedores, num ambiente industrial, e considerados como um ponto de partida para a análise de outras questões estratégicas e de decisão, que permitam concluir acerca da futura integração destes materiais compósitos e respetivas tecnologias de fabrico na cadeia de abastecimento aeronáutica.

De facto, e enquanto cenários que consideram opções de processamento fora de autoclave, a sua adoção para a produção de estruturas primárias de um avião, num contexto de larga escala, encontra-se ainda dependente da análise de determinados fatores e desafios, entre os quais se destacam: custos de investimento associados à aquisição das tecnologias referidas, capacidade produtiva e correspondente satisfação dos níveis de procura do setor, e qualidade final das estruturas produzidas.

O autoclave, utilizado atualmente pela Embraer (cenário de referência), é apresentado como a tecnologia com maiores custos de aquisição. Além disso, a sua estrutura fixa não lhe permite flexibilidade para acomodar as dimensões de todo o tipo de componentes: autoclaves de pequena dimensão não poderão ser utilizados para a cura de componentes superiores à sua capacidade, enquanto autoclaves de grandes dimensões, destinados à cura de estruturas primárias, como asas ou fuselagem, serão subaproveitados e apresentarão alternativas inviáveis para a produção de pequenas estruturas, com custos e consumos energéticos insustentáveis (Strong, 2008). Também o forno, utilizado para a etapa de cura no cenário C e a prensa utilizada na moldagem no cenário D revelam estas limitações – no entanto, apresentam custos de investimento inferiores. O cenário D, apesar do melhor desempenho nos três indicadores analisados (custo, ambiental e duração do processo produtivo), considera custos de investimento superiores aos verificados nos cenários B e C, associados aos requisitos para a obtenção de laminados com propriedades ótimas, que envolvem ferramentas precisas de controlo de temperatura e prensas capazes de suportar elevadas pressões e temperaturas, necessárias para a moldagem de materiais *prepreg* PEEK. Neste contexto, destaca-se o cenário B, onde se utiliza uma tecnologia de molde único (“molde aberto”) para a realização do processo de infusão, com custos inferiores às restantes tecnologias (nomeadamente tecnologias que utilizam molde e contra-molde, como os processos de RTM, e a termoformação em prensa), bem como a elevada flexibilidade e adaptabilidade apresentada, sendo possível expandir facilmente a sua área de produção sem a elevados custos de investimento adicional.

Relativamente à qualidade do componente final obtida, importa referir os recentes avanços nas técnicas de termoformação (presentes no cenário D), que têm promovido o desenvolvimento de novas

oportunidades de aplicação de compósitos termoplásticos e termoendurecíveis em estruturas secundárias e primárias do avião – um mercado para o qual se espera um elevado crescimento ao longo dos próximos anos (Red, 2014). No entanto, e apesar de atualmente ser possível produzir componentes de dimensões consideráveis, a produção de estruturas complexas com materiais termoplásticos apresenta ainda alguns desafios, assim como a obtenção de reduzidas percentagens de volume de vazios, exigida pelos fabricantes – e onde se espera que desenvolvimentos futuros introduzam tempos e custos de processamento superiores aos identificados para o cenário D.

Ainda assim, e tendo em consideração a necessidade de procura de estruturas em materiais compósitos pela indústria aeronáutica, prevê-se um aumento nos níveis de procura e nas taxas de processamento (volume de produção) exigidas às tecnologias analisadas no presente trabalho. De acordo com Advani e Hsiao (2012), e de forma a encarar esta tendência, as tecnologias de processamento OOA apresentam-se como o caminho para fornecer estruturas em compósitos em elevado volume (número de unidades). Assim, enquanto no cenário A, a utilização de autoclave apresenta tempos de processamento que dificilmente poderão ser otimizados, as tecnologias OOA apresentam um enorme potencial. Destacam-se as elevadas taxas de produção associadas ao cenário D, através de curtos tempos da operação de prensagem, bem como a possibilidade de automatização de várias atividades identificadas ao nível da preparação da produção (realizadas manualmente nos cenários B, C e D) – que conduzirá a diminuição da duração total identificada atualmente para os respetivos cenários e que poderá ainda impulsionar melhorias na qualidade apresentada dos componentes produzidos.

Os resultados e os fatores apresentados revelam um impacto significativo na estratégia, no planeamento e nas operações dos fabricantes num horizonte temporal de médio e longo prazo e deverão ser considerados *design* das suas cadeias de abastecimento. Como tal, recomenda-se uma análise mais detalhada em alguns aspectos para os quais foram assumidos muitos pressupostos (entre os quais se destacam os tempos associados às etapas de processamento, os consumos energéticos das diferentes tecnologias utilizadas bem como os respetivos custos de operação).

Remete-se ainda para a importância de alguns obstáculos e desafios que deverão ser considerados no *scale-up* da cadeia de abastecimento do painel de referência considerado no presente estudo, através da gestão da fronteira de análise, de forma a representar os desafios da Embraer Portugal, na introdução destes novos materiais compósitos e processos de produção na sua cadeia de abastecimento.

No trabalho desenvolvido, é analisado e caracterizado o contexto de desenvolvimento de novos materiais, onde os conceitos de colaboração, sustentabilidade e resiliência, são fundamentais. Neste sentido torna-se imperativa uma visão integrada e holística que remete para a importância de questões relacionadas com a definição da fronteira de análise, dos limites de estudo, e em última instância, da fronteira que deverá ser também considerada pelos fabricantes de aviões na gestão das suas cadeias de abastecimento.

De forma a promover a otimização e a sustentabilidade da cadeia de abastecimento, revela-se relevante o estudo, a inclusão e o conhecimento dos fluxos, dos componentes e processos utilizados na produção de matérias-primas e dos fornecedores associados desde a fase de extração, na medida em que, tal como analisado, a sua contribuição para o impacto global dos cenários considerados poderá apresentar valores superiores a 50%.

De facto, conforme abordado no Capítulo 2 e verificado no presente estudo de caso, a cadeia de abastecimento aeronáutica apresenta-se global e a colaboração entre as diferentes entidades envolvidas é decisiva no controlo de custos, no fluxo sincronizado de materiais e informação, na visibilidade e transparência da comunicação, na redução do *lead-time*, na otimização da produção e consecutivamente na qualidade e no sucesso da introdução destes novos materiais na cadeia de abastecimento aeronáutica.

Com os recentes desenvolvimentos verificados na indústria, prevê-se num futuro próximo novos fornecedores sejam certificados na produção de matérias-primas e que apresentem propostas competitivas para a sua integração na cadeia de abastecimento da Embraer. Como tal, cabe à Embraer PT – enquanto Fornecedor de nível 1 da Embraer OEM – auxiliar, gerir e coordenar toda a produção, assumindo um papel fundamental na colaboração entre o OEM e os fornecedores dos níveis a jusante.

Num contexto de decisão, e de acordo com os resultados apresentados, o design e o planeamento da estrutura da rede poderão ainda ser determinantes e ter impacto na resiliência da cadeia de abastecimento – através do controlo da exposição ao risco, da manutenção de stock estratégico e do fornecimento e transporte flexível –, na sustentabilidade – através do compromisso com as principais regulamentações em vigor e empenho nos principais desafios ambientais do futuro –, e na colaboração – através de parcerias, onde custos e proveitos possam ser partilhados, mas também competências ao nível do projeto, conceção e integração destes novos materiais na cadeia de abastecimento aeronáutica.

7. Conclusões Finais e Trabalho Futuro

As cadeias de abastecimento aeronáuticas têm evoluído e sido reorganizadas ao longo do tempo, devido à forte rivalidade entre as empresas do setor, bem como pelos elevados custos de desenvolvimento e riscos inerentes, que têm aumentado a complexidade da indústria aeronáutica. Com o aumento da globalização e o crescimento de parcerias de risco estratégicas, os principais fabricantes (i.e, Boeing, Airbus, Embraer e Bombardier) revelam uma tendência de um modelo integrador de sistemas (LSSI) nos seus mais recentes programas. Esta tendência, encarada como um processo evolutivo, apresenta, no entanto, algumas dificuldades, exigências, oportunidades e fundamentalmente desafios ao nível da gestão da cadeia de abastecimento.

Com base numa exaustiva revisão do estado de arte, é apresentada na dissertação a caracterização das cadeias de abastecimento aeronáuticas baseada na revisão do estado da arte, onde é analisada a sua evolução, definidos os modelos de cadeias de abastecimento do presente e identificados os principais desafios atuais, através de uma visão holística da colaboração entre entidades, da sustentabilidade e da resiliência. Destaca-se ainda o NPD, com recentes e crescentes tendências no desenvolvimento de novos materiais compósitos e respetiva introdução nas cadeias de abastecimento aeronáuticas, onde se refletem muitos dos desafios identificados.

Atualmente, os principais fabricantes de aviões encontram-se focados na busca de estratégias eficazes de NPD, que permitam a otimização das suas cadeias de abastecimento tornando-as mais sustentáveis e que conduzam à obtenção de vantagens competitivas no longo prazo. É o caso da Embraer, apresentada como a terceira maior fabricante de aviões do mundo, e líder no mercado de aviões comerciais na categoria até 130 assentos. Com o desenvolvimento do seu novo programa de E-Jets E2, a Embraer pretende reduzir custos, melhorar a produtividade e a qualidade e aumentar a rapidez e flexibilidade, otimizando a sua cadeia de abastecimento de forma a manter a posição de liderança e competitividade no setor. Neste sentido, surge a necessidade de inovação associada à introdução de novos materiais compósitos e respetivas tecnologias de fabrico na sua cadeia de abastecimento.

No presente trabalho são apresentados os principais desafios associados aos materiais compósitos utilizados na indústria aeronáutica – onde se destacam os custos de produção (onde atualmente se verifica a predominância do processamento em autoclave, com elevados consumos energéticos) e de transporte (com a existência de um número relativamente reduzido de fornecedores certificados a nível global, onde muitos dos materiais utilizados necessitam de ser transportados em condições de refrigeração).

Como tal, são identificadas as mais recentes tendências identificadas ao nível do desenvolvimento de novos processos e materiais compósitos e são identificados, no âmbito do projeto IAMAT três cenários que consideram novos materiais e processos OOA, alternativos ao processo atual padrão de cura de compósitos termoendurecíveis em autoclave: um cenário de processamento de compósitos termoendurecíveis através de infusão de resinas (VARI), cenário de processamento de compósitos termoendurecíveis por VBO (com estágio de cura em forno) e um cenário de processamento de compósitos termoplásticos por termoformação (prensagem a quente).

Para a compreensão das especificidades inerentes aos cenários considerados, bem como das implicações envolvidas à sua integração na cadeia de abastecimento aeronáutica é primeiramente realizada uma breve apresentação dos conceitos fundamentais associados à classificação e caracterização de materiais compósitos e respetivas tecnologias de fabrico. Seguidamente são definidos os cenários e é desenvolvido e apresentado o seu mapeamento, com base nas principais etapas de produção. Posteriormente os cenários são caracterizados, através do estudo e análise das principais diferenças económicas e ambientais (associadas à integração dos respetivos materiais e processos produtivos na cadeia de abastecimento aeronáutica) e são quantificadas e comparadas com base no estudo de caso da Embraer.

O segmento da cadeia de abastecimento analisado encontra-se centralizada na Embraer PT (enquanto fornecedor de nível 1) e inclui: o fornecimento de matérias-primas através de fornecedores de nível 2 - considerados fixos para cada uma das matérias-primas consideradas, dados os elevados requisitos de certificação da indústria aeronáutica; a respetiva produção de compósitos nas fábrica da Embraer PT através dos vários processos considerados; e o conseqüente envio do produto final para o OEM, a Embraer Brasil. Os dados apresentados encontram-se adaptados à produção de um demonstrador, enquanto unidade funcional de pequena escala, representativa toda uma família de possíveis produtos de aplicação aeronáutica onde este componente possa ser futuramente integrado. São estimados os tempos de processamento associados a cada uma das etapas de produção, definidos os principais custos de aquisição e produção (com base nas tecnologias alocadas) e considerados os principais impactos ambientais envolvidos, através dos consumos energéticos em kg equivalentes, associados à obtenção das matérias-primas, produção e transporte.

Os principais resultados da avaliação económica e ambiental desenvolvida revelam um desempenho superior de todos os cenários OOA face ao cenário atual de produção em autoclave. Após uma análise integrada o cenário de produção de compósitos termoplásticos por termoformação revela o melhor desempenho global, apresentando menores custos, menor impacto ambiental e um menor tempo total de processamento.

Dado o âmbito do presente trabalho, limitado ao nível de duração e restringido pelas simplificações e pressupostos utilizados na obtenção de dados, sugerem-se ainda algumas oportunidades de melhoria e considerações adicionais que deverão ser tidas em conta em desenvolvimentos futuros, entre as quais:

A limitação da aplicabilidade dos dados analisados a um nível industrial poderá conduzir a variações nos resultados, na medida em que foram obtidos com base em estimativas ou recolhidos na literatura, e aplicados num ambiente laboratorial.

A análise de impactos ambientais desenvolvida é apenas parcial e considera apenas emissões de CO_2 , devido à ineficácia da utilização de metodologias LCA complexas e integrais (como por exemplo, a metodologia *ReCipe*) no contexto identificado. De facto, as bases de dados consideradas por estas metodologias (entre as quais se destaca a base de dados *Ecoinvent*), não contemplam, de momento, dados relativos à obtenção de matérias-primas e respetivos processos produtivo de materiais compósitos. Como tal, recomenda-se a sua adaptação e desenvolvimento futuro, de forma a incluir dados relevantes que possam ser utilizados para a obtenção de resultados mais precisos e conclusivos.

O estudo, a inclusão e o conhecimento dos fluxos, dos componentes e processos utilizados na produção de matérias-primas e dos fornecedores associados desde a fase de extração deverá ser aprofundado, na

medida em que a sua contribuição para o impacto global dos cenários considerados poderá apresentar valores superiores a 50%.

Após a sistematização de dados, conhecimentos e resultados obtidos presente trabalho (grande parte dos quais, inexistentes na literatura) tornam-se relevantes desenvolvimentos futuros que incluam as potencialidades de modelos analíticos de network planning – focados no desenvolvimento de novos materiais compósitos e que englobem uma abordagem holística, onde aspetos de sustentabilidade sejam considerados. Os modelos de otimização analisados na dissertação – entre os quais se destacam os desenvolvidos nos trabalhos de Motal et al. (2015; 2017) – apresentam formulações genéricas e poderão ser adaptados de forma a representar as tendências, os desafios e as principais decisões estratégicas e táticas associadas à introdução de novos materiais compósitos e respetivos processos produtivos na cadeia de abastecimento aeronáutica.

Destaca-se ainda a importância de obstáculos e desafios que deverão ser analisados no scale-up da cadeia de abastecimento considerada no presente estudo, através de uma correta definição da fronteira de análise, na medida em que a colaboração entre as diferentes entidades envolvidas é fundamental e imprescindível para o sucesso da introdução destes novos materiais na cadeia de abastecimento e consequentemente para a obtenção de vantagens competitivas dos principais fabricantes da indústria aeronáutica.

Bibliografia

- A.T.Kearney (2003). Restructuring the Global Aerospace Industry: The Shifting Roles of Supplier. Report. Disponível em: http://www.seaonline.org/docs/Restruct_aerospa-B5929.pdf. Acedido a 23/04/2017.
- ACARE (2010). Aeronautics and air transport: beyond vision 2020 (towards 2050). Report. Disponível em: https://www.kowi.de/Portaldata/2/Resources/fp/aeronautics-and-air_transport-beyond-vision_2020.pdf. Acedido a 15/02/2017.
- Advani, S. e Sozer, E. (2003). Process Modeling in Composites Manufacturing: Polymer Matrices for Composites, 5-9, *Marcel Dekker*.
- Ageorges, C. e Ye, L. (2002). Fusion Bonding of Polymer Composites, *Springer*.
- Airbus (2009). A350 XWB first composite lay-up manufactured in Nantes. Disponível em: <http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2009/12/a350-xwb-first-composite-lay-up-manufactured-in-nantes.html>. Acedido a 04/07/2017.
- Airbus (2016). Global Market Forecast 2017-2036. Disponível em: [http://company.airbus.com/news-media/press-releases/Airbus-Group/Financial Communication/2017/06/Nearly-35-000-aircraft-valued-at-US-5-3-trillion-required-in-the-next-20-years.html](http://company.airbus.com/news-media/press-releases/Airbus-Group/Financial%20Communication/2017/06/Nearly-35-000-aircraft-valued-at-US-5-3-trillion-required-in-the-next-20-years.html). Acedido a 14/02/2017.
- Alfalla-luque, R., Medina-lopez, C. e Schrage, H. (2012). A study of supply chain integration in the aeronautics sector. *Production Planning and Control: The Management of Operations*, 24(8): 769-784.
- Amin, S.H. e Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6): 4165-4176.
- Andersen, P.A. (2010). China's Emergent Military Aerospace and Commercial Aviation Capabilities. Report. Disponível em: <https://www.uscc.gov/sites/default/files/transcripts/5.20.10HearingTranscript.pdf>. Acedido a 07/03/2017.
- Andersson, F., Hagqvist, A., Sundin, E. e Björkman, M. (2014). Design for Manufacturing of Composite Structures for Commercial Aircraft – The Development of a DFM Strategy at SAAB Aerostructures. *Procedia CIRP*, 17:362-367.
- Avlonitis, G. J., Papastahopoulou, P. G., e Gounaris, S. P. (2001). An Empirically-Based Typology of Product Innovativeness for New Financial Services: Success and Failure Scenarios. *Journal of Product Innovation Management*. 18:324-342.
- Bales, R.R., Maull, R.S. e Radnor, Z. (2004). The development of supply chain management within the aerospace manufacturing sector. *Supply Chain Management*, 9(3): 250-255.
- Bannister, M. (2001). Challenges for composites into the next millennium – a reinforcement perspective. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(7): 901-910
- Barbosa-Póvoa, A.P. (2014). Process supply chains management – where are we? Where to go next?. *Process and Energy Systems Engineering*, 2: 23.

- Bastos, C.E. (2006). Atributos de parcerias de sucesso em cadeias de suprimentos: um estudo de caso na relação fabricante-fornecedor na indústria aeronáutica. Tese de Mestrado em Administração. Universidade de São Paulo.
- Beelaerts, W.W., Amoa, S.O.B. e Santema, S. (2012). Measuring value-leverage in aerospace supply chains. *International Journal of Operations & Production Management*, 32(8): 982-1007.
- Beelaerts, W.W., Santema, S. e Curran, R. (2010). Encyclopedia of Aerospace Engineering: Lean Supply Chain Management in Aerospace. *Delft University of Technology*.
- Bernstein, M. (2006). Boeing shrinks supply chain to facilitate 'risk sharing'. Disponível em: <http://www.worldtrademag.com>. Acedido a 02/05/2017.
- Boeing (2011). Boeing's path to the Dreamliner. Disponível em: https://usatoday30.usatoday.com/travel/flights/2007-07-09-boeing-787-debuts_N.html. Acedido a 05/04/2017.
- Boeing (2016). Long-Term Market: Current Market Outlook 2016-2035. Disponível em: http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/about-our-market/assets/downloads/cmo_print_2016_final_updated.pdf. Acedido a 14/02/2017.
- Boeing (2016b). Boeing Market Inside. Disponível em: <http://www.boeing.com/commercial/market/>. Acedido a 17/02/2017.
- Boeing (2017). Composites in the Airframe and Primary Structure. Disponível em: http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html. Acedido a 04/07/2017.
- Bojarski, A. D., Lainez, J. M., Espuna, A., e Puigjaner, L. (2009). Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach. *Computers & Chemical Engineering*, 33(10):1747-1759.
- Bonaccorsi, A. e Giuri, P. (2000). When shakeout doesn't occur. The evolution of the turboprop engine industry. *Research Policy*, 29(7): 847-870.
- Boukherroub, T., Ruiz, A., Guinet, A. e Fondrevelle, J. (2015). An integrated approach for sustainable supply chain planning. *Computers & Operations Research*, 54: 180-194.
- Bourban, P.-E., Bernet, N., Zanetto, J. E. e Månson, J.-A. E. (2001). Material phenomena controlling rapid processing of thermoplastic composites. *Composites Part A*, 32(8):1045-1057.
- Bozarth, C.C., Warsing, D.P., Flynn, B.B. e Flynn, E.J. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance. *Journal of Operations Management*, 27(1): 78-93.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J. e Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233: 299-312.
- Braziotisa, C., Tannocka, J. e Bourlakis, M. (2017). Strategic and operational considerations for the Extended Enterprise: insights from the aerospace industry. *Taylor & Francis Group*, 28: 267-280.

- Brundtland, G.H. (1987). World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Report. Disponível em: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>. Acedido a 07/03/2017.
- Caetano, R. (2012). Produção Aeronáutica: Análise do desenvolvimento nacional. Tese de Mestrado em Engenharia Aeronáutica. Universidade da Beira Interior.
- Calantone, R., Chan, K. e Cui, A. S. (2006). Decomposing Product Innovativeness and Its Effects on New Product Success. *The Journal of Product Innovation Management*, 23(5): 408-421.
- Calantone, R., Chan, K., e Cui, A. S. (2006). Decomposing Product Innovativeness and Its Effects on New Product Success. *Journal of Product Innovation Management*, 23(5): 408-421.
- Capgemini (2011). The Changing Face of the Aerospace & Defense Industry. Report. Disponível em: <https://www.capgemini.com/resources/the-changing-face-of-the-aerospace-and-defense-industry>. Acedido a 10/01/2017.
- Cardoso, S., Barbosa-Póvoa, A.P., Relvas, S. e Novais, A. (2015). Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty. *Omega*, 56: 53-73.
- Carter, C.R. e Rogers, S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5): 360-387.
- Carvalho, A., Matos, H.A. e Gani, R. (2013). SustainProd - A tool for systematic process analysis, generation and evaluation of sustainable design alternatives. *Computers & Chemical Engineering*, 50: 8-27.
- Carvalho, H. e Cruz-Machado, V. (2007). Designing principles to create resilient supply chains. 2007 Industrial Engineering Research Conference, Nashville.
- Carvalho, H., Barroso, A., Machado, V., Azevedo, S. e Cruz-machado, V. (2012). Supply chain redesign for resilience using simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1): 329-341.
- Cassiolato, J., Bernardes, R. e Lastres, H. (2002). Transfer of technology for successful integration into the global economy: A case study of Embraer in Brazil. *United Nations Press*.
- Centea, T., Grunenfelder, L.K. e Nutt, S.R. (2015). A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites Part A*, 70:132-154
- Chaabane, A., Ramudhin, A. e Paquet, M. (2011). Designing supply chains with sustainability considerations. *Production Planning and Control*, 22(8): 727-41.
- Chandler, A.D. (1992). Organizational capabilities and the economic history of the industrial enterprise. *The Journal of Economic Perspectives*, 6: 79-100.
- Chibeles-Martins, N., Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A.P. e Novais, A.Q. (2016). A multi-objective meta-heuristic approach for the design and planning of green supply chains – MBSA. *Expert Systems with Applications*, 47: 71-84.
- Chopra, S. e Meindl, P. (2012). Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation. 1-528, *Pearson*.
- Chouvion, B., Popov, A., Ratchev, S., Mason, C. e Summers, M. (2011). Interface Management in Wing-Box Assembly. *SAE Technical Paper*: 2011-01-2640.

- Christopher, M. e Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *International Journal of Logistics Management*, 15(2): 1-13.
- Christopher, M. e Rutherford, C. (2004). Creating a supply chain Resilience through Agile Six Sigma. *Critical Eye Publications LTD*, 1(6): 24-28.
- Christopher, M. e Towill, D. (2000). Supply chain migration from lean and functional to agile and customized. *Supply Chain Management: An International Journal*, 5(4): 206-213.
- Cizmeci, D. (2005). An Examination of Boeing's Supply Chain Management Practices within the Context of the Global Aerospace Industry. MSc Thesis in Logistics. Massachusetts Institute of Technology.
- Comissão Europeia (2003). Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - Integrated Product Policy - Building on Environmental Life-Cycle Thinking. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52003DC0302>. Acedido a 13/09/2017.
- Comissão Europeia (2011). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook, *European Union*.
- Corallo, A., Laubacher, R., Margherita, A. e Turrisi, G. (2009). Enhancing Product Development Through Knowledge-Based Engineering (KBE): A Case Study in the Aerospace Industry. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(8): 1070-1083.
- Corominas A., Mateo, M., Ribas I. e Rubio, S. (2015). Methodological elements of supply chain design. *International Journal of Production Research*, 43: 1-15.
- Curkovic, S. e Sroufe, R. (2010). Using ISO 14001 to promote a sustainable supply chain strategy. *Business Strategy and the Environment*, 20(2): 71-93.
- Cytec (2017). Prepregs & Resins. Disponível em: <http://www.cytec.com/businesses/aerospace-materials/products/prepregs-resins>. Acedido a 07/09/2017.
- De Brentani, U., Kleinschmidt, E. J. e Salomo S. (2010). Success in Global New Product Development: Impact of Strategy and the Behavioural Environment of the Firm. *Journal of Product Innovation Management*, 27(2):143-160.
- DEFRA UK (2008). Energy and carbon conversions. Disponível em: <http://www.knowlton.org.uk/wp-content/files/Energy%20carbon%20conversions.pdf>. Acedido a 29/09/2017.
- Delbard, O. (2008). CSR legislation in France and the European regulatory paradox: an analysis of EU CSR policy and sustainability reporting practice. *Corporate Governance*, 8(4): 397-405.
- Deloitte (2009). Can we afford our own future? Why A&D programs are late and over-budget - and what can be done to fix the problem. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/manufacturing/us-ad-canweaffordourownfuture-0127.pdf>. Acedido a 06/03/2017. Acedido a 07/01/2017.
- Deloitte (2016). Global Aerospace and Defense Industry Outlook 2016. Report. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Manufacturing/gx-manufacturing-2016-global-ad-sector-outlook.pdf>. Acedido a 23/02/2017.

- Devika, K., Jafarian, A. e Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: a comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3): 594-615.
- Drumwright, M. (1994). Company advertising with a social dimension: the role of noneconomic criteria. *Journal of Marketing*, 60(4): 71-87.
- Ecorys (2009). Competitiveness of the EU Aerospace Industry with focus on Aeronautics Industry. Report. Disponível em: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/aerospace/files/aerospace_studies/aerospace_study_en.pdf. Acedido a 24/02/2017.
- Eiriz, V. (2001). Proposta de tipologia sobre alianças estratégicas. *Revista de Administração Contemporânea*, 5(5): 65-90.
- Elkington, J. The triple bottom line, does it all add up? Assessing the sustainability of business and CSR: Enter the triple bottom line. 1-186, *Earthscan Publications Ltd*.
- Embraer (2014). Relatório Anual 2014. Disponível em: <http://www.embraer.com.br/relatorioanual2014/>. Acedido a 10/03/2017.
- Embraer (2015). Relatório Anual 2015. Disponível em: <http://ri.embraer.com.br/Download.aspx?Arquivo=AtqVXjFI0NIGfrinuRiuyQ==>. Acedido a 01/03/2017.
- Embraer (2016). História. Disponível em: <http://www.embraer.com.br/pt-BR/ConhecaEmbraer/TradicaoHistoria/Paginas/default.aspx>. Acedido a 12/12/2016.
- Embraer (2017). Relatório Trimestral 2017. Disponível em: <http://ri.embraer.com.br/listresultados.aspx?idCanal=dwxMd7dcHTw/kwbNAc2ESQ==>. Acedido a 12/03/2017.
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J. e Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54: 11-32.
- Esposito, E. & Raffa, L. (2006). Evolution of the Supply Chain in the Aircraft Industry. Ipsera Conference 2006, San Diego.
- Esposito, E. (2004). Strategic alliances and internationalisation in the aircraft manufacturing industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 71(5): 443-468.
- Esposito, E. e Passaro, R. (2009). The evolution of supply chain relationships: an interpretative framework based on the Italian inter-industry experience. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 15(2): 114-126.
- European Commission (2011). Flightpath 2050 Europe's Vision for Aviation. Report. Disponível em: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/doc/flightpath2050.pdf>. Acedido a 13/02/2017.
- Eurostat (2009). Aerospace equipment production statistics - NACE Rev. 1.1. Disponível em: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Archive:Aerospace equipment production statistics - NACE Rev. 1.1](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Archive:Aerospace_equipment_production_statistics_-_NACE_Rev._1.1). Acedido a 09/02/2017.

- Exostar (2007). BOEING 787: Global Supply Chain Management Takes Flight Leveraging. Disponível em: <https://www.e2open.com/resources/boeing-787-global-supply-chain-management-takes-flight>. Acedido a 04/05/2017
- FAA (2012). Federal Aviation Administration – Aviation Maintenance Technician Handbook Airframe: Advanced Composite Materials, *Mepcount Media LLC*.
- Figueiredo, P., Silveira, G. e Sbragia, R. (2008). Risk sharing partnerships with suppliers: the case of Embraer. *Journal of Technology Management and Innovation*, 3(1): 27-37.
- Fontes, S.S. (2004). Aprendizagem organizacional em cadeias de suprimento de sistemas complexos de produção: estudo de caso da Embraer. Tese de Mestrado em Administração. Universidade Federal da Bahia Salvador.
- Gates, D. (2005). Boeing 787: parts from around world will be swiftly integrated. Disponível em: <http://www.seattletimes.com/business/boeing-787-parts-from-around-world-will-be-swiftly-integrated/>. Acedido a 15/04/2017.
- Gay, D. e Hoa, S. V. (2007). Composite Materials: Design and Applications, *CRC Press*.
- Ghadge, A., Dani, S. e Kalawsky, R. (2010). A framework for managing risks in the aerospace supply chain using systems thinking. International Conference on System of Systems Engineering, United Kingdom.
- Goetschalckx, M. e Fleischmann, B. (2005). Supply Chain Management and Advanced Planning: Strategic Network Planning, 117-137, *Springer*.
- Goldstein, A. (2002). Embraer: from national champion to global player. *CEPAL Review*, 77(8): 97-15.
- Govindan, K., Soleimani, H. e Kannan, D. (2015). Reversed logistics and closed-loop supply-chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240: 603-626.
- Graham, G. e Ahmed, P. (2000). Buyer-supplier management in the aerospace value chain. *Integrated Manufacturing Systems*, 11(7): 462-468.
- Guerra, J. (2011). Systems integration model in the aerospace industry: motivating factors. *Gestão & Produção. São Carlos*, 18(12): 251-264.
- Hamel, G. e Prahalad, C.K. (1990). The Core Competence of the Corporation, *Harvard Business Review*, 68(5): 79-93.
- Hansen, J.D., Melnyk, S.A. e Calantone, R. (2004). Core values and environmental management: a strong inference approach. *Greener Management International*, 46(6): 29-40.
- Harshe, R. (2015). A Review on Advanced Out-of-Autoclave Composites Processing. *Journal of the Indian Institute of Science*, 95(3):207-220.
- Hexcel (2016). Relatório e Contas 2016. Disponível em: <http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=75598&p=irol-reportsAnnual>. Acedido a 04/09/2017.
- Hodges, C.P. (2009). Sustainability: How-to Guide Series. Getting Started. Disponível em <http://feapc.com/wp-content/uploads/2012/09/Sustainability-How-To.pdf>. Acedido a 15/03/2017.

- Holmes, S. (2005). Boeing's plastic dream machine. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2005-06-19/boeings-plastic-dream-machine>. Acedido a 20/04/2017.
- Hooghe, E. L. e Edwards, C. M. (1999). Thermoplastics Fit for Structural Use?. *Reinforced Plastics*, 43(10): 22.
- Hornig, T-C. (2007). A comparative analysis of supply chain management practices by Boeing and Airbus: long-term strategic implications. MSc Thesis in Transportation. Massachusetts Institute of Technology.
- Hutchins, M.J. e Sutherland, J.W. (2008). An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions. *Journal of Cleaner Production*, 16(15): 1688-1698.
- Iakovou, E., Vlachos, D. e Xanthopoulos, A. (2007). An analytical methodological framework for the optimal design of resilient supply chains. *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, 1: 1-20.
- ICAO (2011). Aviation & Sustainability: Determining the complex environmental, economic and social impacts that are defining aviation's future. Report. Disponível em: https://www.icao.int/publications/journalsreports/2011/6606_en.pdf. Acedido a 04/03/2017.
- Ilgin, M.A. e Gupta, S.M. (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): a review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91(3): 563-591.
- Inteli (2005). Diagnóstico do sector Aeronáutico em Portugal. Disponível em: www.inteli.pt/pt/go/aero-2005. Acedido a 11/02/2017.
- ISO (2006). Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. Disponível em: http://www.pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_14040-2006.pdf. Acedido a 13/09/2017.
- Jain, H. K. (2009). Laminated Composite Stiffened Panels: Applications and Behaviour. *Civil Engineering Conference Innovation Without Limit (CEC-09)*, NIT Hamirpur.
- Ji, G. e Zhu, C. (2008). Study on supply chain disruption risk management strategies and model. IEEE 2008, international conference on service systems and service management, Melbourne.
- Jiménez-González, C., Kim, S. e Overcash, M. (2000) Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5:153-159.
- Johansen, K., Comstock, M. e Winroth, M. (2005). Coordination in collaborative manufacturing mega-networks: a case study. *Journal of Engineering and Technology Management*, 22: 226-244.
- Junior, J.T.B. (2007). Global production networks, the developmental state and the articulation of Asia Pacific economies in the commercial aircraft industry. *Asia Pacific Viewpoint*, 48(12): 312-329.
- Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K. e Yong, G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. *Resources, Conservation and Recycling*, 67: 75-9.
- Kaw, A. K. (2006). Mechanics of Composite Materials, *CRC Press*.
- Kazerouni, A. M., Achiche, S., Hisarciklilar, O. e Thomson, V. J. (2011). Appraisal of New Product Development Success Indicators in the Aerospace Industry. *Journal of Mechanical Design*, 133(10):101013-101024.
- Kihlman, H. (2005). Affordable Automation for Airframe Assembly: Development of Key Enabling Technologies, *Linköping University Electronic Press*.

- Kitazawa, S. e Sarkis, J. (2000). The relationship between ISO 14001 and continuous source reduction programs. *International Journal of Operations and Production Management*, 20(2): 225-248.
- Kleindorfer, P. R. e Saad, G. H. (2005). Managing disruption risks in supply chains. *Production and Operations Management*, 14(1): 53-68.
- Krikke, H. (2011). Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: a case study in copiers. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(12): 1196-1205.
- Kull, T. (2008). The risk of second-tier supplier failures in serial supply chains: Implications for order policies and distributor autonomy. *European Journal of Operational Research*, 186(3): 1158-1174.
- Kumar, Y. K. e Lohchab, D. S. (2016). Influence of Aviation Fuel on Mechanical properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 2(4):58-65.
- Laframboise, K. e Reyes, F. (2007). The digitization of an aerospace supply network. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 3(2): 68-89.
- Lam, Y. Y. R. (2005). Designing and implementing a new supply chain paradigm for airplane development. MSc Thesis in Industrial Engineering. Massachusetts Institute of Technology.
- Lancioni, R.A., Smith, M.F. e Schau, H.J. (2003). Strategic internet application trends in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 32: 211-217.
- Laseter, T.M. e Ramdas, K. (2002). Product types and supplier roles in product development: an exploratory analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 4: 104-118.
- Lima, J.C.C.O., Pinto, M.A.C., Migon, M.N., Montoro, G.C.F. e Alves, M.F. (2005). A cadeia aeronáutica brasileira e o desafio da inovação. *BNDES Setorial*, 21(3): 31-55.
- Lira-Barragán, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M. e El-Halwagi, M.M. (2011). An MINLP model for the optimal location of a new industrial plant with simultaneous consideration of economic and environmental criteria. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 50(2): 953-64.
- Loschky, A. (2009). High-Technology Trade Indicators. Disponível em: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC55698/2009%20report%20on%20high%20tech%20trade.pdf>. Acedido a 09/04/2017.
- Malarranha, C., Barbosa-Póvoa, A. e Carvalho, A. (2017). Aerospace supply chain in the new and sustainable product development context. CIE47, Lisboa.
- Mallick, P. (1997). Composites Engineering Handbook: Thermosetting resins, 119-124, *Marcel Dekker*.
- Manzini, R., Gamberi, M., Gebennini, E. e Regattieri, A. (2008). An Integrated Approach to the Design and Management of a Supply Chain System. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37: 625-640.
- Markley, J. e Davis, L. (2007). Exploring future competitive advantage through sustainable supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(9): 763-774.
- Marsden, C., Fews, R., Oldroyd, P. e Yousefpour, A. (2011). Design for Manufacture - One-Piece, Fibre-Placed Composite Helicopter Tailboom. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

- Mason, K. (2006). Autoclave Quality Outside The Autoclave?. Composite World. Disponível em: <http://www.compositesworld.com/articles/autoclave-quality-outside-the-autoclave>. Acedido a 28/08/2017.
- McAdam, R., O'Hareb, T. e Moffetta, S. (2008). Collaborative knowledge sharing in Composite New Product Development: An aerospace study. *Technovation*, 28: 245-256.
- McCrum, N. G., Buckley C. P. e C. B. Bucknall (1997). Principles of Polymer Engineering, *Oxford University Press*.
- Mendels, F.F. (1972). Proto-industrialization: the first phase of the industrial process. *The Journal of Economic History*, 32: 241-261.
- Michaels, L.M.J. (1999). The making of a lean aerospace supply chain. *Supply Chain Management*, 4(3): 135-144.
- Miracle, D. B. e Donaldson, S. L. (2001). ASM Handbook Volume 21: Composites, *ASM International*.
- Morais, A. B., Magalhães, A. G. e Moura, M. F. (2009). Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, *PUBLINDUSTRIA*.
- Morton, S.C., Dainty, A.R.J., Burns, N.D., Brookes, N.J. e Backhouse, C.J. (2006). Managing relationships to improve performance: a case study in the global aerospace industry. *International Journal of Production Research*, 44(16), 3227-3241.
- Mota, B., Gomes, M.I., Carvalho, A. e Barbosa-Póvoa, A.P. (2015a). Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105: 14-27.
- Mota, B., Gomes, M.I., Carvalho, A. e Barbosa-Póvoa, A.P. (2015b). Design and Planning of Sustainable Supply Chains. *Computer-Aided Chemical Engineering*, 36: 333-349.
- Mota, B., Gomes, M.I., Carvalho, A. e Barbosa-Póvoa, A.P. (2017). Sustainable supply chains: an integrated modelling approach under uncertainty. *Omega* (em submissão).
- Mouritz, A. (2012). Introduction to Aerospace Materials: Polymers for aerospace structures, 276-279, *Woodhead Publishing*.
- Mrazova, M. (2013). Innovations, technology and efficiency shaping the aerospace environment. *INCAS BULLETIN*, 5(2): 91-99.
- NAICS (2012). 2012 NAICS: 3364 - Aerospace product and parts manufacturing. Disponível em: <https://www.census.gov/econ/isp/sampler.php?naicscode=3364&naicslevel=4#>. Acedido a 02/03/2017.
- National Science and Technology Council (2011). Materials Genome Initiative for Global Competitiveness. Report. Disponível em: https://www.mgi.gov/sites/default/files/documents/materials_genome_initiative-final.pdf. Acedido a 11/05/2017.
- Nelson, R.R. e Winter, S.G. (1982). An Evolutionary Theory or Economic Change. 1-437, *Harvard University Press*.

- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S. e Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60:498-508.
- NetComposites (2017). Infusion Processes. Disponível em: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/infusion-processes/>. Acedido a 25/09/2017.
- Niggemann, C., Song, Y. S., Gillespie, J. W. e Heider, D. (2008). Experimental Investigation of the Controlled Atmospheric Pressure Resin Infusion (CAPRI) Process. *Journal of Composite Materials*, 42(11):1049-1061.
- Niosi, J. e Zhegu, M. (2005). Aerospace clusters: local or global knowledge spillovers?. *Industry and Innovation*, 12(3): 5-29.
- Niosi, J. e Zhegu, M. (2008). Innovation System Life Cycle in the Aircraft Sector. 25th Celebration Conference, Copenhaga.
- Norman, W. e MacDonald, C. (2004). Getting to the bottom of 'triple bottom line'. *Business Ethics Quarterly*, 14(2): 243-262.
- Norrman, A., Sweden, L. e Jansson, U. (2004). Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 34(5): 434-456.
- Novak, S. e Eppinger, S. (2001). Sourcing by design: product complexity and the supply chain. *Management Science*, 47: 189-204.
- O'Neill, H. e Sackett, P. (1994). The extended manufacturing enterprise paradigm. *Management Decision*, 32(8): 42-49.
- OCDE. (2011). ISIC REV. 3 - Technology Intensity Definition: Classification of manufacturing industries into categories based on R&D intensities. Disponível em: <https://www.oecd.org/sti/ind/48350231.pdf>. Acedido a 25/01/2017.
- Oliveira, L.G. (2005). A cadeia de produção aeronáutica no Brasil: uma análise sobre os fornecedores da Embraer. Tese de Doutorado em Política Científica e Tecnológica. Universidade Estadual de Campinas.
- Oliver Wyman (2015). Challenges for European Aerospace Supplier. Disponível em: <http://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2015/mar/challenges-for-european-aerospace-suppliers.html>. Acedido a 23/05/2017.
- Paksoy, T., Pehlivan, N.Y. e Özceylan, E. (2012). Fuzzy multi-objective optimization of a green supply chain network with risk management that includes environmental hazards. *Human and Ecological Risk Assessment*, 18(5): 1120-1151.
- Papapostolou, C., Kondili, E. e Kaldellis, J. (2011). Development and implementation of an optimisation model for biofuels supply chain. *Energy*, 36(10): 6019-6026.
- Peck, H. (2005). Drivers of supply chain vulnerability: An integrated framework. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 35(4): 210-232.

- Petrick, I. (2007). Tipping the balance of power: the case of Large Scale Systems Integrators and their supply chains. *Int. J. Foresight and Innovation Policy*, 3(3): 240-255.
- Pickett, C. B. (2006). Prepare for supply chain disruptions before they hit. *Logistics Today*, 47(6): 22-25.
- Pinto-Varela, T., Barbosa-Póvoa, A.P. e Novais, A.Q. (2011). Bi-objective optimization approach to the design and planning of a supply chain: economic versus environmental performances. *Computers and Chemical Engineering*, 35(8): 1454-1468.
- Pishvaei, M.S., Jolai, F. e Razmi, J. (2010a). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28: 107-114.
- Pishvaei, M.S., Rabhani, M. e Torabi, S.A. (2010b). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network. *Applied Mathematical Modelling*, 35: 637-649.
- Plambeck, E. L. (2012). Reducing greenhouse gas emissions through operations and supply chain management. *Energy Economics*, 34(1): 64-74.
- plastics for mass-produced passenger cars, *The Ninth Japan International SAMPE Symposium*, Japão.
- Ponomarov, S. e Holcomb, M. (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, 20(1): 124-43.
- Potential emissions savings of lightweight composite aircraft componentes evaluated through life cycle assessment. *Express Polymer Letters*, 5(3): 209-217.
- Pritchard, D. e MacPherson, A. (2004). Outsourcing US commercial aircraft technology and innovation: implications for the industry's long term design and build capability. White Paper. Disponível em: https://www.academia.edu/4546470/Outsourcing_US_Commercial_Aircraft_Technology_and_Innovation_Implications_for_the_Industrys_Long_Term_Design_and_Build_Capability. Acedido a 07/03/2017.
- Pritchard, D. e MacPherson, A. (2005). Boeing's Diffusion of Commercial Aircraft Design and Manufacturing Technology to Japan: Surrendering the US Aircraft Industry for Foreign Financial Support. Report. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237597355_Boeing's_Diffusion_of_Commercial_Aircraft_Design_and_Manufacturing_Technology_to_Japan_Surrendering_the_US_Aircraft_Industry_for_Foreign_Financial_Support. Acedido a 04/01/2017.
- PwC (2009). Changing Dynamics: India's Aerospace Industry. Report. Disponível em: <https://www.pwc.in/assets/pdfs/industries/changing-dynamics-india-aerospace-industry-091211.pdf>. Acedido a 25/03/2017.
- PwC (2013). The next generation supply chains – efficient, fast and tailored. Disponível em: www.pwc.com/GlobalSupplyChainSurvey2013. Acedido a 14/02/2017.
- Rana, S. e Figueiro, R. (2016). Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, *Springer*.
- Red, C. (2014). CompositesWorld: The Outlook for Thermoplastics in Aerospace Composites, 2014-2023. Disponível em: <https://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-thermoplastics-in-aerospace-composites-2014-2023>. Acedido a 03/10/2017.

- Reed, F.M. e Walsh, K. (2002). Enhancing technological capability through supplier development: a study of the U.K aerospace industry. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 49(3): 231-242.
- Rice, J. B. e Caniato, F. (2003). Building a secure and resilient supply network. *Supply Chain Management Review*, 7(5): 22-30.
- Ridgard, C. (2009). Out of Autoclave Composite Technology for Aerospace, Defense and Space Structures. *Proceedings of SAMPE 2009 conference of the society for the advancement of materials and process engineering*, Baltimore, Estados Unidos.
- Roos, S. e Szpieg, M. (2012). Life cycle assessment of Z-Bee, *Swerea IVF AB*.
- Rose-anderssen, C., Baldwin, J., Ridgway, K. e Strathern, M. (2008). The evolution of commercial aerospace supply chains and the facilitation of innovation. *International Journal of Electronic Customer Relationship Management*, 2(1): 63-84.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Póvoa, A.P. e Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2): 336-349.
- Sathiendrakumar, R. (2003). Greenhouse emission reduction and sustainable development. *International Journal of Social Economics*, 30(12): 1233-1248.
- Scelsi, I., Bonner, M., Hodzic, A., Soutis, C., Wilson, C., Scaife, R. e Ridgeway, K. (2011).
- Schmitt, B. (2000). From co-operation to integration: defense and aerospace industries in Europe. *Chaillot Paper*, 40(7): 1-105.
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54(4): 1513-1520.
- Seuring, S. e Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15): 1699-1710.
- Shah, N. (2005). Process industry supply chains: Advances and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 29(6): 1225-1236.
- Sharma, S. e Vredenburg, H. (1998). Proactive corporate environmental strategy and the development of competitively valuable organisational capabilities. *Strategic Management Journal*, 19(8): 729-753.
- Sheffi, Y. (2005). Weathering the storm. CPO Agenda Home – Winter, London.
- Smith, D.J. e Tranfield, D. (2005). Talented suppliers? Strategic change and innovation in the UK aerospace industry. *R&D Management*, 35(1): 37-49.
- Statista (2015). Number of jets added to the global aircraft fleet from 1997 to 2015, by manufacturer (in units). Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/622779/number-of-jets-delivered-global-aircraft-fleet-by-manufacturer/>. Acedido a 01/03/2017.
- Stewart, R. (2009). New prepreg materials offer versatility, top performance. *Reinforced Plastics magazine*, 53(5):28-33.
- Strategy& (2017). 2017 Aerospace and Defense Trends. Disponível em: <https://www.strategyand.pwc.com/trend/2017-defense-trends>. Acedido a 25/02/2017.

- Strong, A.B. (2008). *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers.
- Suzuki, T. e Takahashi, J. (2005). Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced
- Talaei, M., Moghaddam, B.F., Pishvae, M.S., Bozorgi-Amiri, A. e Gholamnejad, S. (2015). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry. *Journal of Cleaner Production*, 113: 662-673.
- Talke, K., Salomo, S., Wieringa, E. J. e Lutz, A. (2009). What About Design Newness? Investigating the Relevance of a Neglected Dimension of Product Innovativeness. *Journal Product. Innovation Management*, 26(8): 601-615.
- Tan, K.C., Lyman, S.B. e Wisner, J.D. (2002). Supply chain management: a strategic perspective. *International Journal of Operations and Production Management*, 22: 614-631.
- Tang, C. (2006). Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. *International Journal of Logistics*, 9(1): 33-45.
- Tang, C.S. e Zimmermen, J.D. (2009). Managing New Product Development and Supply Chain Risks: The Boeing 787 Case. *An International Journal*, 10(2): 74-86.
- Tang, Z.E., Goetschalckx, M. e McGinnis, L. (2013). Modeling-based Design of Strategic Supply Chain Networks for Aircraft Manufacturing. *Procedia Computer Science*, 16(3): 611-620.
- Teal Group (2017). The End Of The Airbus-Boing Supercycle. Disponível em: <http://aviationweek.com/commercial-aviation/opinion-end-airbus-boeing-supercycle>. Acedido a 15/02/2017.
- Trowbridge, P. (2001). A case study of green supply chain management at advanced micro devices. *Greener Management International*, 35(9): 121-135.
- U.S. Department of Energy (2015). Composite Materials. Disponível em: <https://energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/QTR2015-6E-Composite-Materials.pdf>. Acedido a 10/09/2017.
- Vrijhoef, R. (2011). Supply Chain Integration in the Building Industry: The Emergence of Integrated and Repetitive Strategies in a Fragmented and Project-driven Industry. 1-321, *IOS Press*.
- Whooley, N. (2004). Social Responsibility in Europe. Disponível em: <http://www.pwc.com/extweb/newcolth.nsf/0/503508DDA107A61885256F35005C1E35>. Acedido a 27/03/2017
- Willard, B. (2002). The Sustainability Advantage – Seven Business Case Benefits of a Triple Bottom Line, 1-179, *New Society*.
- Williams, T., Maull, R. e Ellis, B. (2002). Demand chain management theory: constraints and development from global aerospace supply webs. *Journal of Operations Management*, 20: 691-706.
- Williamson, A. e Padmapriya, N. (2016). Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, *Elsevier*.

- Witik, R., Gaille, F., Teuscher, R., Ringwald, R., Michauda, V. e Manson, J. (2012). Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 29: 91-102
- You, F. e Wang, B. (2011). Life cycle optimization of biomass-to-liquids supply chains with distributed-centralized processing networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(17): 10102-10127.
- Zsidisin, G.A. e Smith, M.E. (2005). Managing supply risk with early supplier involvement: a case study and research propositions. *Journal of Supply Chain Management*, 41(4): 44-57.

Anexos

Anexo A: Determinação das quantidades de matérias primas para produção unitária

Dimensões do demonstrador

	Dimensão (mm)
Comprimento	500
Largura	150
Altura	4
Volume (cm ³)	300

Matérias-primas utilizadas para a produção de uma unidade funcional

Cenário 1 - Autoclave

Cenário	Material	Espessura (mm)	Camadas necessárias	Área por camada (m ²)	Qtd total (m ²)
A	Prepreg HexPly M21	0,184	22	0,075	1,63

Cenário B - Infusão de Resinas

Cenário	Material	Densidade (g/cm ³)	Fracção Volume	Vol. "efetivo" (cm ³)	Espessura camada	Camadas necessárias	Área por camada (m ²)	Qtd total	Und
B	Reforço de Fibras de Carbono Hitape AS7	1,79	58%	174	0,054	43	0,075	3,19	m ²
	Resina Epóxi HexFlow RTM6-2	1,11	42%	126	-	-	-	140	gramas

NOTA: com largura do fita=8,26mm; com área transversal da fita=0,45mm²

Cenário C - Vacuum Bag Only

Cenário	Material	Espessura (mm)	Camadas necessárias	Área por camada (m ²)	Qtd total (m ²)
C	Prepreg (OoA) HexPly M56	0,194	21	0,075	1,55

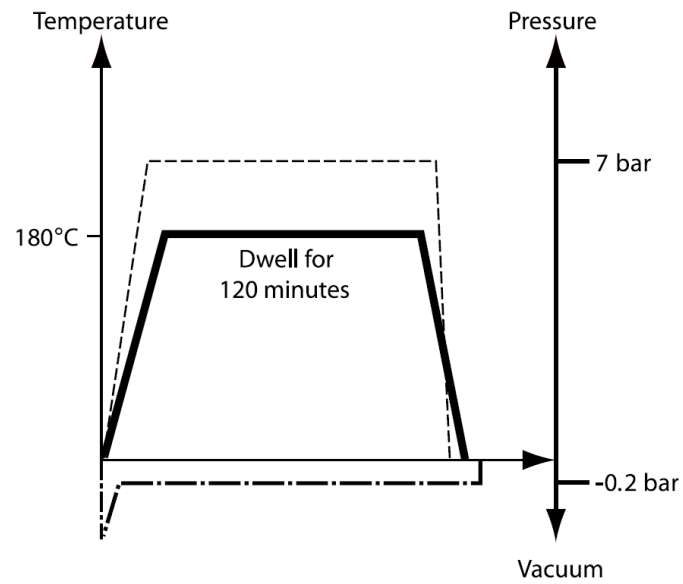
Cenário D - Termoformação - Prensagem a quente

Cenário	Material	Espessura (mm)	Camadas necessárias	Área por camada (m ²)	Qtd total (m ²)	Densidade (g/cm ³)	Qtd total (gramas)
D	Prepreg Termoplástico APC-2-PEEK	0,16	25	0,075	0,160	1,32	396

Anexo B: Recomendações do fornecedor - etapa de cura em autoclave (Cenário A)

 **HexPly® M21**
180°C (350°F) curing epoxy matrix

 **HEXCEL**
Product Data Sheet



Typical Autoclave Cure Monolithic Part <15mm (0.6") thick (1)

Anexo C: Recomendações do fornecedor – etapas de mistura e injeção (Cenário B)



HexFlow® RTM6-2

Process Specification

Mixing:

- Mix ratio in weight: Part A: 100, Part B: 68.1 (for volume mix ratio or any other details please contact Hexcel Technical Support)
- Preheat temperature for Part A: 60-80°C, Preheat temperature for Part B: 85 ± 5°C (for around 12 hours)
- Pour part B into part A and mix together at defined mix ratio
- Stir slowly at a maximum of 80°C for 30 minutes

Injection:

- Preheat resin at 70 - 80°C in the injection pot
- Preheat the mould at 120°C
- Inject the resin (80°C) under vacuum/low pressure (1 to 5 bar)

Degasing can be done if necessary

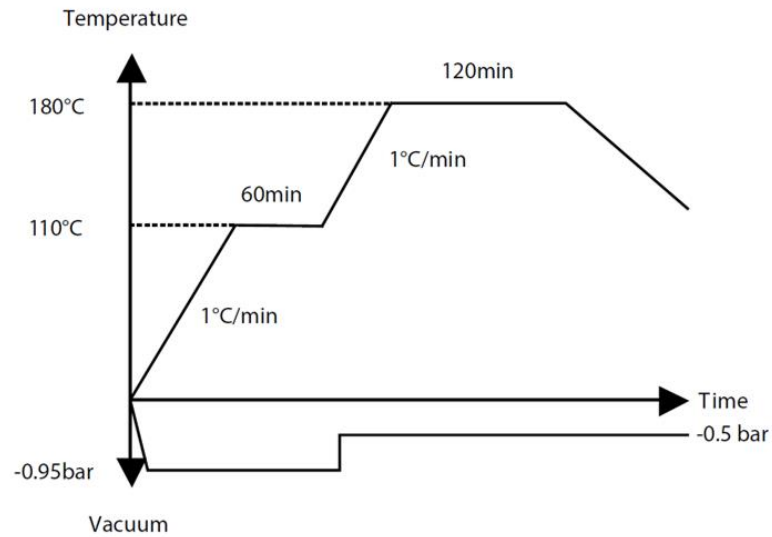
Standard Cure and Post-cure Cycle

Recommended cure cycle : 120 min at 180 °C - no postcure

Anexo D: Recomendações do fornecedor - etapa de cura em forno (Cenário C)

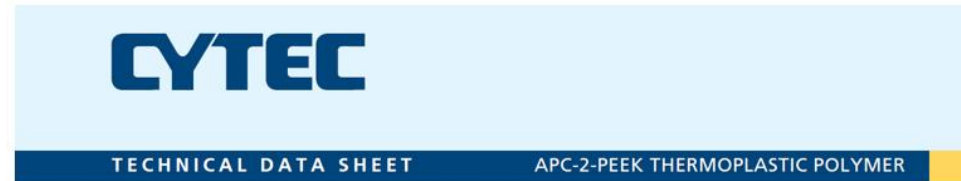
 **HexPly® M56**
180°C (350°F) Out-Of-Autoclave Curing Matrix

 **HEXCEL**
Product Data Sheet

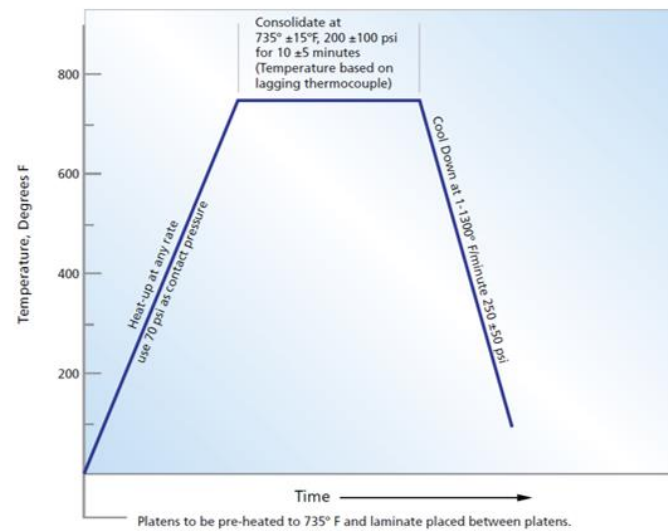


Typical Oven Cure Monolithic Part

Anexo E: Recomendações do fornecedor - etapa de consolidação em prensa (Cenário D)



APC-2-PEEK Thermoplastic Polymer



Recommended Cure Cycle for Press Molding

Anexo F: Consumo energético das tecnologias vácuo, autoclave, forno e prensa

Cenário	Principais Atividades Consideradas	Duração (horas)	Autoclave/Forno/Prensa				Vácuo	Consumo Energético Total (kWh)
			% Potência Associada	Tecnologia Utilizada	Potência Efetiva (kW)	Consumo Energético (kWh)	Consumo Energético (kWh)	
A	Aumento da temperatura do autoclave até 180°C.	2	60%	Autoclave	16,20	32,40	2,00	48,53
	Estágio de cura realizado a 180°C.	2	20%	Autoclave	5,40	10,80	2,00	
	Arrefecimento no forno até à temperatura ambiente (20°C).	1,33	-	-	-	-	1,33	
B	Mistura dos componentes da resina.	0,5	60%	Forno	2,88	1,44	0,50	19,99
	Ciclos de compactação.	0,83	-	-	-	-	0,83	
	Aquecimento da resina (80°C) e do molde (120°C).	0,88	60%	Forno	2,88	2,54	0,88	
	Processo de infusão.	0,67	-	-	-	-	0,67	
	Aquecimento do material no forno (de 80°C) até 180°C.	1,08	60%	Forno	2,88	3,11	1,08	
	Estágio de cura realizado a 180°C.	2	60%	Forno	2,88	5,76	2,00	
	Arrefecimento no forno até à temperatura ambiente (20°C).	1,17	-	-	-	-	1,17	
C	Ciclos de compactação.	0,83	-	-	-	-	0,83	24,47
	Aumento da temperatura do forno até 110°C.	1	60%	Forno	2,88	2,88	1,00	
	Primeiro estágio de cura realizado a 110°C.	1	60%	Forno	2,88	2,88	1,00	
	Aumento da temperatura do forno até 180°C.	0,75	60%	Forno	2,88	2,16	0,75	
	Segundo estágio de cura realizado a 180°C.	3	60%	Forno	2,88	8,64	3,00	
	Arrefecimento no forno (até atingir os 40°C).	1,33	-	-	-	-	1,33	
D	Pré-aquecimento do material no forno.	1,08	60%	Forno	2,88	3,11	-	4,02
	Prensagem a quente (a 390°C).	0,17	60%	Prensa	1,80	0,31	-	
	Aquecimento e arrefecimento da prensa.	0,33	60%	Prensa	1,80	0,60	-	

Anexo G: Impacto ambiental associado à atividade de transporte por caminhão refrigerado

Opção	Referência (factores de caracterização)	kg CO2 eq
1	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO6, R134a refrigerant, freezing {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000235246
2	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO6, R134a refrigerant, cooling {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000235246
3	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refrigerant, freezing {GLO} market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refri(...)_15 Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000219937
4	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refrigerant, cooling {GLO} market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refrig(...)_9 Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000219937
5	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO6, R134a refrigerant, freezing {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000527365
6	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO6, R134a refrigerant, cooling {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000527365
7	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refrigerant, freezing {GLO} market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refr(...)_13 Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000512056
8	1 kgkm Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refrigerant, cooling {GLO} market for transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO6, carbon dioxide, liquid refri(...)_5 Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000512056
	Valor médio	0,000373651

Anexo H: Impacto ambiental associado à atividade de transporte por caminhão

Opção	Referência (factores de caracterização)	kg CO2 eq
1	1 kgkm Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000184045
2	1 kgkm Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000428498
3	1 kgkm Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000141933
4	1 kgkm Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000071720
	Valor médio	0,000206549

Anexo I: Impacto ambiental associado à atividade de transporte por navio

Opção	Referência (factores de caracterização)	kg CO2 eq
1	1 kgkm Transport, freight, sea, transoceanic tanker {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000004700
2	1 kgkm Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000009137
3	1 kgkm Transport, freight, sea, liquefied natural gas {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000023720
4	1 kgkm Transport, freight, inland waterways, barge tanker {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000033977
5	1 kgkm Transport, freight, inland waterways, barge {GLO} market for Conseq, U (of project Ecoinvent 3 - consequential - unit)	0,000036560
	Valor médio	0,000021619

Anexo J: Impacto ambiental associado à atividade de transporte da cadeia de abastecimento

Cenário	Matéria Envolvida	Massa Total Transportada (kg)	Distância Percorrida (km)	Meio de Transporte Utilizado	kg CO2 eq/(km.kg)	kg CO2 eq	kg CO2 eq total
A	M1	0,48	1655	camião refrigerado	0,000373651	0,296828	0,296828
B	M2	0,62	1655	camião	0,000206549	0,211940	0,211940
	M3	0,14	1655	camião	0,000206549	0,047857	
C	M4	0,32	1655	camião refrigerado	0,000373651	0,197886	0,197886
D	M5	0,4	52	camião	0,000206549	0,004296	0,129600
			13210	navio	0,000021619	0,114233	
			134	camião	0,000206549	0,011071	
-	prod. final	0,4	134	camião	0,000206549	0,011071	0,120959
			9784	navio	0,000021619	0,084607	
			306	camião	0,000206549	0,025282	

Anexo K: Custeio das principais atividades de processamento dos cenários considerados

Cenário	Principais Atividades Consideradas	Duração	Duração (horas)	Recurso/ Tecnologia 1	Custo 1	Recurso/ Tecnologia 2	Custo 2	Custo Total Atividade
A	Corte das camadas de <i>prepreg</i> ; Laminagem e preparação do molde; Preparação do saco de vácuo.	01 h 01 min	1,02	Operador	25,42			25,42
	Aumento da temperatura do autoclave até 180°C.	02 h 00 min	2,00	Vácuo	10,00	Autoclave	140,00	150,00
	Primeiro estágio de cura realizado a 180°C.	02 h 00 min	2,00	Vácuo	10,00	Autoclave	140,00	150,00
	Arrefecimento no forno até à temperatura ambiente (20°C).	01 h 20 min	1,33	Vácuo	6,67	Autoclave	93,33	100,00
	Finalização e acabamento	00 h 10 min	0,17	Operador	4,17			4,17
B	Mistura dos componentes da resina. Corte das camadas de tecido de fibra; Preparação da infusão; Preparação do saco de vácuo.	00 h 30 min	0,50	Forno	10,00			10,00
	Ciclos de Compactação (a vácuo).	01 h 50 min	1,83	Operador	45,83			45,83
	Aquecimento da resina (80°C) e do molde (120°C).	00 h 50 min	0,83	Vácuo	4,17			4,17
	Processo de infusão.	00 h 53 min	0,88	Forno	17,67			17,67
	Aquecimento do material no forno (de 80°C) até 180°C.	00 h 40 min	0,67	Vácuo	3,33			3,33
	Estágio de cura realizado a 180°C.	01 h 05 min	1,08	Vácuo	5,42	Forno	21,67	27,08
	Arrefecimento no forno até à temperatura ambiente (20°C).	02 h 00 min	2,00	Vácuo	10,00	Forno	40,00	50,00
	Finalização e acabamento	01 h 10 min	1,17	Vácuo	5,83	Forno	23,33	29,17
C	Corte das camadas de <i>prepreg</i> ; Laminagem e preparação do molde; Preparação do saco de vácuo.	00 h 10 min	0,17	Operador	4,17			4,17
	Ciclos de Compactação (a vácuo).	01 h 10 min	1,17	Operador	29,17			29,17
	Aumento da temperatura do forno até 110°C.	00 h 50 min	0,83	Vácuo	4,17			4,17
	Primeiro estágio de cura realizado a 110°C.	01 h 00 min	1,00	Vácuo	5,00	Forno	20,00	25,00
	Aumento da temperatura do forno até 180°C.	01 h 00 min	1,00	Vácuo	5,00	Forno	20,00	25,00
	Segundo estágio de cura realizado a 180°C.	00 h 45 min	0,75	Vácuo	3,75	Forno	15,00	18,75
	Arrefecimento no forno (até atingir os 40°C).	03 h 00 min	3,00	Vácuo	15,00	Forno	60,00	75,00
	Finalização e acabamento	01 h 20 min	1,33	Vácuo	6,67	Forno	26,67	33,33
D	Corte das camadas de <i>prepreg</i> ; Laminagem e preparação do molde.	00 h 10 min	0,17	Operador	4,17			4,17
	Pré-aquecimento em forno.	04 h 15 min	4,25	Operador	106,25			106,25
	Prensagem a quente (a 390°C).	01 h 05 min	1,08	Forno	21,67			21,67
	Aquecimento e arrefecimento da prensa.	00 h 10 min	0,17	Prensa	15,00			15,00
	Finalização e acabamento	00 h 20 min	0,33	Prensa	30,00			30,00