

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ANÁLISE DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS  
PARA INTERIORES DE AERONAVES EXECUTIVAS INCORPORANDO  
ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE

Celise Villa dos Santos

São Carlos-SP

2015



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE DE CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS  
PARA INTERIORES DE AERONAVES EXECUTIVAS INCORPORANDO  
ASPECTOS DE SUSTENTABILIDADE**

Celise Villa dos Santos

Tese apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia  
de Materiais como requisito parcial à  
obtenção do título de DOUTORA EM  
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. José Angelo Rodrigues Gregolin

São Carlos

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar  
Processamento Técnico  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237a Santos, Celise Villa dos  
Análise de critérios de seleção de materiais e processos para interiores de aeronaves executivas incorporando aspectos de sustentabilidade / Celise Villa dos Santos. -- São Carlos : UFSCar, 2016.  
144 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2015.

1. Seleção de materiais. 2. Seleção de processos.  
3. Interior de aeronaves. 4. Sustentabilidade. I.  
Título.

## **VITAE DO CANDIDATO**

Especialista em manufatura aeronáutica pela Embraer (2001), Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFSCar (2001), Engenheira de Materiais pela UFSCar (1999).





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

---

**Folha de Aprovação**

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado da candidata Celise Villa dos Santos, realizada em 02/12/2015:

---

Prof. Dr. José Angelo Rodrigues Gregolin  
UFSCar

---

Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini  
UFSCar

---

Prof. Dr. Tomaz Toshimi Ishikawa  
UFSCar

---

Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto  
USP

---

Profa. Dra. Maria Helena Robert  
UNICAMP



## AGRADECIMENTOS

Ao professor José Angelo Rodrigues Gregolin pela atenção, apoio e orientação deste doutorado.

Ao professor Daniel Rodrigo Leiva e ao Fábio Rodrigues Costa pela colaboração nesta pesquisa.

Aos professores Claudemiro Bolfarini, José Augusto Marcondes Agnelli e Márcio Raymundo Morelli, pelas contribuições na qualificação.

Aos colegas do NIT Materiais pelo convívio.

Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela atenção dispensada.

À Universidade Federal de São Carlos e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela oportunidade de realização deste doutorado.

Ao Alexandre Rossi, à Maria Helena dos Santos, à Fernanda Miranda e à Maria Silvia Martins Biancardi pelo apoio nas dificuldades da jornada.



## RESUMO

Os materiais e processos aplicados na fabricação dos interiores de aeronaves executivas tem um importante papel na diferenciação estética e competitiva do produto, em um cenário de crescente concorrência e pressões para um produto mais sustentável. Tem-se verificado que a seleção desses materiais e processos, nas primeiras etapas do desenvolvimento do produto, têm adotado medidas limitadas para redução de custos e melhorias ambientais na manufatura, o que se reflete na incipiência de publicação científica disponível. A pesquisa aborda o processo de seleção de materiais e processos que incorpore estes fatores aos demais requisitos de clientes e do projeto aeronáutico, o que requer informações especializadas e metodologias de análise estabelecidas para essa abordagem de prioridades. O objetivo foi avaliar os atuais materiais e processos e identificar novas oportunidades, buscando uma estratégia para melhorar a metodologia de seleção, como contribuição para a maior integração projeto – materiais – processos. A principal ferramenta analítica empregada foi o Mapeamento de fluxo de valor, associando conceitos de manufatura enxuta, projeto para fabricação e montagem, *ecodesign* e ciclo de vida dos produtos. O mapeamento aplicado a estudos de caso envolvendo um item de mobiliário mostrou-se adequado para aproximar requisitos ambientais e de manufatura às atividades de prospecção e seleção de materiais e processos. A pesquisa também explorou soluções depositadas em patentes e conhecimentos de outros segmentos industriais que estivessem em sintonia com as oportunidades prospectadas. Um exemplo são os painéis sólidos de bio-plásticos reforçados com fibras naturais, como substitutos aos materiais estruturais produzidos a partir de fontes não-renováveis e tóxicas, e que requerem adição de resinas para reforços e fechamento do núcleo tipo colmeia. Verificou-se sinergia entre as possíveis soluções orientadas para melhoria do desempenho econômico, e as para melhoria da sustentabilidade ambiental do produto, como exemplo as resinas de cura por radiação ultravioleta para acabamento dos painéis.



## **ANALYSIS OF MATERIALS AND PROCESSES SELECTION CRITERIA FOR EXECUTIVE AIRCRAFT INTERIORS INCLUDING SUSTAINABILITY ISSUES**

### **ABSTRACT**

Materials and processes used to manufacture executive aircraft interiors play an important role in aesthetic and competitive product differentiation, in a scenario where there is growing competition and pressures for more sustainable products. It has been observed that the selection of these materials and processes, in the early stages of product development, has introduced limited measures to reduce costs and environmental improvements in manufacturing, which is reflected in the scientific literature available. This research addresses procedures for materials and processes selection including these factors, as well as other customer and aeronautical design requirements, which requires specialized information and methods of analysis established for this approach of priorities. The aim was to evaluate the current materials and processes and identify new opportunities, looking for a strategy to improve the selection methodology, as a contribution to greater integration design - materials - processes. The main analytical tool used was Value Stream Mapping, associating concepts of lean manufacturing, design for manufacturing and assembly, ecodesign and product lifecycle. Mapping applied to case studies involving an item of furniture was suitable to draw closer environmental requirements and manufacturing prospecting activities, as well as selecting materials and processes. The research also explored solutions filed on patents and knowledge from other industrial sectors which were in line with the opportunities. One example is biopolymer solid panels reinforced with natural fibres, as substitutes for structural materials produced from non-renewable and toxic sources, which require adding resins to reinforce and close the honeycomb core. There was synergy between the possible solutions aimed at improving the economic performance and environmental sustainability of the product, such as ultraviolet radiation curable resins to finish the panels.



## PUBLICAÇÕES

SANTOS, C.V. et al. Materials selection for sustainable executive aircraft interiors. *Materials Research*, (aprovado para publicação).

SANTOS, C.V. et al. Metodologia para a seleção de materiais sustentáveis de interiores de aeronaves. In: ENCONTRO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DE SÃO CARLOS, 2, 2014, São Carlos. 1 CD-ROM.



## ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÃO .....	i
AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	xv
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Aeronaves executivas e a importância dos materiais e processos utilizados na fabricação do seu interior .....	1
1.2 Objetivos .....	7
2 SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA INTERIORES DE AERONAVES.....	9
2.1 Materiais atualmente empregados em interiores de aeronaves.....	9
2.2 Seleção de materiais e processos no desenvolvimento do produto.....	15
2.3 Abordagens para redução de perdas na fabricação .....	25
2.4 Abordagens para melhoria ambiental dos produtos.....	31
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	43
3.1 Procedimento geral .....	43
3.2 Levantamento de informações .....	44
3.3 Planejamento de estudos de caso e ferramentas analíticas .....	50
3.4 Organização e análise dos resultados.....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Materiais e processos de fabricação do mobiliário de interiores de aeronaves.....	59
4.1.1 Requisitos para materiais e aplicação no desenvolvimento do produto .....	59
4.1.2 Tecnologias de materiais e processos empregados .....	63
4.2 Análise de perdas no processo de fabricação .....	70
4.2.1 Atividades necessárias que não agregam valor ao produto.....	70
4.2.2 Desperdícios de tempo no ciclo de produção e de matérias-primas .....	74
4.2.3 Perdas devido às estratégias de uso dos materiais no produto, de suprimento de matérias-primas e de expedição do produto acabado .....	76
4.3 Análise do impacto ambiental dos materiais e processos.....	78

4.3.1 Problemática ambiental dos materiais empregados.....	78
4.3.2 Problemática ambiental da manufatura .....	83
4.4 Potencial de melhorias da sustentabilidade econômica e ambiental associadas aos materiais e processos.....	87
4.4.1. Melhorias para redução de perdas .....	87
4.4.2 Melhorias para redução do impacto ambiental .....	95
4.5 Prospecção de soluções em materiais para um mobiliário econômica e ambientalmente sustentável.....	103
4.5.1 Análise de patentes .....	103
4.5.2 Análise por analogia de segmentos de mobiliários residenciais e náuticos.....	108
4.6 Proposta de procedimento de seleção de materiais e processos .....	112
4.6.1 Seleção de materiais e processos durante o desenvolvimento do produto .....	112
4.6.2 Seleção de materiais e processos na fase de conceito do produto.....	113
4.6.3 Seleção de materiais e processos na fase de detalhamento do produto .....	115
4.6.4 Seleção de materiais e processos das fases de testes e refinamento, até o final do ciclo de vida do produto.....	118
5 CONCLUSÃO.....	121
6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	125
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	127
APÊNDICE A .....	143
Tempos e análise de agregação de valor para os processos e etapas de fabricação do gabinete modelo.....	143

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - Elementos de mobiliário do interior de aeronaves executivas.....	11
Figura 2.2 - Requisitos para a seleção de materiais e processos no projeto de interiores aeronáuticos.....	13
Figura 2.3 - Desdobramento do produto para análise de funções.....	22
Figura 2.4 - Exemplo de representação do Mapa de Fluxo de Valor para registro do estado atual e indicação das oportunidades de melhoria.....	30
Figura 2.5 - Parâmetros para determinação de eco-indicadores para materiais...	36
Figura 3.1 - Materiais selecionados, e detalhes da estrutura de sustentação e dos acabamentos do gabinete modelo.....	51
Figura 3.2 - Técnicas de construção, e materiais para junção e fixação dos elementos estruturais selecionados para o móvel do estudo de caso.....	52
Figura 3.3 - Proposta de representação das informações no mapeamento do fluxo de valor para resultados ambientais.....	55
Figura 3.4 - Painel sanduíche utilizado como estudo de caso.....	56
Figura 3.5 - Esquema da organização e análise dos resultados.....	57
Figura 4.1 - Requisitos para seleção dos materiais no desenvolvimento de móveis para aeronaves executivas.....	60
Figura 4.2 - Sequência de aplicação dos requisitos para seleção de materiais no desenvolvimento de móveis para interiores de aeronaves executivas.....	61
Figura 4.3 - Rotas de fabricação de mobiliário aeronáutico a partir da utilização de material composto na estrutura.....	64
Figura 4.4 - Rota 1 para fabricação de móveis aeronáuticos.....	65
Figura 4.5 - Rota 2 para fabricação de móveis aeronáuticos.....	66
Figura 4.6 - Exemplo de junção quase imperceptível de peças em fórmica para atendimento ao requisito visual de móvel aeronáutico.....	67
Figura 4.7 - Distribuição dos tempos de processamento entre as etapas da rota de processo 1 para o gabinete modelo: tempos percentuais de agregação de valor em cada etapa e distribuição percentual da agregação de valor no tempo total de processamento.....	71
Figura 4.8 - Mapeamento de fluxo de valor para o estado atual do gabinete modelo, fabricado pela rota de processo 1.....	72

Figura 4.9 - Agregação de valor na etapa 1 de fabricação de peças em painel sanduíche para o gabinete modelo.....	73
Figura 4.10 - Agregação de valor na etapa 3 de pré-montagem para o gabinete modelo.....	75
Figura 4.11 - Aspectos de sustentabilidade no ciclo de vida dos painéis sanduíche do estudo de caso, utilizados na produção de móveis aeronáuticos..	79
Figura 4.12 - Mapeamento do fluxo de valor ambiental atual da manufatura do gabinete modelo, e rota de processo 1.....	84
Figura 4.13 - Potencialidades de melhorias para o mobiliário de aeronaves executivas.....	88
Figura 4.14 - Potencialidade de melhorias ambientais na para fabricação de móveis para interiores de aeronaves executivas.....	99
Figura 4.15 - Evolução do patenteamento associado aos materiais e à sustentabilidade para interiores de aeronaves.....	105
Figura 4.16 - Sentidos de direcionamento de uso de tecnologias na fabricação de mobiliários aeronáutico, residencial e náutico.....	109
Figura 4.17 - Requisitos e demandas de análise do cliente, do projeto aeronáutico, de sustentabilidade ambiental, e de otimização da manufatura, para a seleção de materiais e processos durante o desenvolvimento do produto.	113

## SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

- CNC - Computer Numerical Control (Controle Numérico Computadorizado)
- DFA – *Design for Assembly* (Projeto para montagem)
- DFM - *Desing for Manufacturing* (Projeto para fabricação)
- DFMA - *Desing for Manufacturing and Assembly* (Projeto para fabricação e montagem)
- DFX - *Design for excelence* (Projeto para excelência)
- E – Estoque
- EPI(s) – Equipamento(s) de proteção individual
- FIMMA - Feira Internacional de Máquinas, Matérias-primas e acessórios para a indústria moveleira
- FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise de modo de falha e efeitos)
- Hh - Hora homem
- Hm - Hora máquina
- LABACE - *Annual Latin American Business Aviation Conference & Exhibition* (Conferência & Exibição Anual Latino Americana da Aviação Executiva)
- MDF – *Medium Density Fiberboard* (Placa de fibra de madeira de média densidade.
- MFV – Mapeamento de Fluxo de Valor
- NIT/Materiais - Núcleo de Informação Tecnológica em Materiais
- PPGCEM - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFSCar
- PPGCTS - Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Sociedade da UFSCar
- QFD - *Quality Function Deployment* (Desdobramento da Função Qualidade)
- TOPSIS - *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (Técnica para ordem de preferência por semelhança com a solução ideal)
- T/C - tempo de ciclo
- UFSCar – Universidade Federal de São Carlos



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Aeronaves executivas e a importância dos materiais e processos utilizados na fabricação do seu interior

Os materiais possuem papel importante na construção de interiores de aeronaves, por propiciarem oportunidades de diferenciação do produto, de redução de custos de manufatura e de aumento da percepção ambiental pela sociedade e pelos clientes. A seleção de materiais e processos de manufatura é particularmente importante para o segmento da aviação executiva, que passa por grandes transformações devido à crescente concorrência [1-2].

Aeronaves executivas fazem parte da categoria da aviação geral, que engloba os tipos de aeronaves que não são de uso militar ou de voos regulares de linhas aéreas comerciais. Abrangem aviões a jato, turboélice, a pistão e helicópteros, de propriedade individual ou compartilhada.

As aeronaves executivas do tipo jato se dividem em categorias que vão desde aviões pequenos (cerca de três passageiros) até aeronaves de grande porte, capazes de realizarem voos internacionais sem paradas para reabastecimento, e equipadas para proporcionar grande conforto para até cerca de 50 passageiros. O preço de venda dessas aeronaves normalmente varia entre US\$ 2 e 64 milhões, podendo chegar a US\$ 300 milhões a exemplo do *Airbus A380 Flying Palace* do Príncipe Al Waleed da Arábia Saudita [3].

Os principais fabricantes desses jatos são Bombardier (Canadá), Gufstream (EUA), Cessna (EUA), Embraer (Brasil), Dassault (França), Boeing (EUA), Hawker Beechcraft (EUA) e Airbus (França/Alemanha/Inglaterra).

A produção de aeronaves executivas é um nicho de mercado importante para a indústria aeronáutica brasileira, que ocupa posição de destaque em volume de vendas desde 2009. Em 2014, por exemplo, das 722 aeronaves executivas disponibilizadas no mercado mundial, 116 foram produzidas pela brasileira Embraer [4]. É um segmento da aviação no qual o aumento da demanda está fortemente relacionado ao crescimento econômico e ao aumento da riqueza [5]. Outro fator da demanda é o desempenho da aviação comercial,

com atrasos, congestionamentos, procedimentos de segurança muito restritivos, baixa privacidade etc.

Os consumidores de jatos executivos estão localizados principalmente na América do Norte e Europa, com tendência de migração para mercados emergentes na América Latina, Ásia, Oriente Médio e África [4]. Com esta migração, visualiza-se nos próximos 20 anos o surgimento de indústrias aeronáuticas em países como China, Índia e Rússia. Estes países, além de poderem vir a fabricar produtos 20 a 25% mais baratos devido a menores custos de mão de obra e despesas gerais, seu crescimento como novas e fortes economias, com capacidade de investimento em tecnologia, acirra ainda mais a disputa em um segmento que já é bastante competitivo. Neste contexto, surgem oportunidades e necessidades para os atuais fabricantes aumentarem o valor agregado de seus produtos, ao mesmo tempo em que se observam pressões sociais e governamentais para redução de impactos ambientais [1- 2].

Aeronaves executivas são utilizadas principalmente por empresas de diferentes portes, nas quais a maioria dos passageiros são gerentes e funcionários que vêm a aeronave como ferramenta de trabalho e como fator de produtividade. Ela possibilita o cumprimento de agendas que não poderiam ser atendidas pelos vôos comerciais regulares, permitindo que cheguem a destinos não atendidos por estes vôos, e que trabalhem ou se reunam durante o deslocamento. A cabine pode propiciar a condução de trabalhos individualmente ou em time, com acesso a todas as facilidades de um escritório, incluindo telecomunicação [6].

Outro fator de vantagem proporcionado pelos voos em aeronaves executivas inclui a segurança privada ou industrial (sigilo e preservação de propriedade intelectual). De modo geral, os clientes demandam rapidez, flexibilidade, privacidade e boa relação custo/ benefício x produtividade nas suas viagens [6-7].

Enquanto que cerca de 3% das aeronaves executivas são de propriedade de “grandes fortunas”, ou indivíduos muito ricos, o uso comercial é realizado majoritariamente por pequenas empresas que operam 59% das

aeronaves. Estas empresas geralmente têm sido consideradas bastante inovadoras, com marcas fortes e admiradas, como bons lugares para trabalhar, fortes em governança corporativa e responsabilidade social [8]. A aeronave executiva de propriedade destas empresas pode ser considerada como um elemento de sua marca, o que reforça a necessidade do produto aeronáutico contribuir para a transferência dos seus valores aos usuários e à sociedade.

Entre as empresas que utilizam aeronaves executivas, 75% possuem apenas uma aeronave [6]. Uma das implicações dessa característica é o fator emocional na escolha do produto, com forte interferência do proprietário da companhia e de sua família, que poderão utilizar a aeronave também para lazer.

Embora aeronaves executivas também sejam utilizadas por um amplo leque de organizações, incluindo governos, universidades e instituições de caridade, estão inseridas em um mercado majoritariamente de luxo, e seu uso nem sempre é bem entendido ou aceito pela sociedade, que tende a percebê-las como supérfluas. Do ponto de vista ambiental, elas apresentam um alto índice de emissão de gases do efeito estufa *per capita* [9]. O conceito de luxo está relacionado à raridade, varia para cada indivíduo e sua cultura, e pode ser associado, não só ao valor econômico dos materiais/produtos e sua escassez, mas também a aspectos emocionais como utilização do tempo escasso, conforto, atitudes ecológicas etc [10].

O interior é provavelmente o local da aeronave onde o luxo é mais bem percebido, nos elementos de design e sensações proporcionadas pelo mobiliário e revestimento interno, na qualidade e nos detalhes do acabamento, e, pelo uso de materiais de alta tecnologia ou exclusivos, como os laminados de madeira utilizados para revestimento dos móveis [11-12].

No interior também estão as principais possibilidades de interferência do cliente e personalização, com diferentes demandas estéticas em função de preferências culturais e dos segmentos de mercado [9]. A percepção do valor da aeronave pelas características do seu interior, faz com que o interior seja de grande potencial para sofrer aprimoramentos que aumentem a competitividade do produto.

O interior das aeronaves executivas é composto basicamente por peças fabricadas com materiais leves, tais como: a) painéis de revestimento de teto e laterais fabricados a partir de placas de material composto revestidas com filmes termoplásticos ou couro sintético; b) assentos fabricados em estrutura de alumínio e materiais compostos, revestidos com espumas, filmes termoplásticos, tecidos e couros naturais ou sintéticos; e, c) itens de mobiliário como mesas, armários, toaletes e divisórias, fabricados a partir de uma estrutura de painéis de material composto revestida com materiais de acabamento, como laminados de madeira ou plástico, tintas, vernizes, tecidos e couro natural ou sintético [9, 13-18].

Enquanto a diferenciação do produto pode ser associada à escolha dos materiais, especiais ou personalizados, as possibilidades de redução de custos do interior da aeronave estão relacionadas principalmente à otimização da manufatura e ao custo das matérias-primas. A otimização da manufatura para o interior aeronáutico tem sido normalmente limitada pelo projeto do produto, concebido geralmente a partir de poucos materiais de uso consolidado, e selecionados por critérios fortemente influenciados pelo design do produto [9].

Apesar da importância dos processos de manufatura, eles ainda têm sido pouco considerados nas etapas iniciais do desenvolvimento do projeto do interior aeronáutico, principalmente a maneira como os diversos processos e matérias-primas irão interagir entre si durante a fabricação do produto, o que poderia potencializar resultados de redução de custos caso fossem mais bem considerados. Por exemplo, podem trazer significativa redução de custo o uso de materiais e um projeto que possibilitem processos com fluxos contínuos de produção, sem refluxos ou formação de estoques intermediários, e suficientemente flexíveis para absorver alterações de personalização do produto [19]. Essa baixa atenção à importância da manufatura nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto parece ocorrer não somente no setor aeronáutico, mas também em grande parte de outros setores industriais, pois é muito limitada na literatura científica a disponibilidade de conceitos, metodologias, casos e resultados sobre a articulação entre projeto - seleção de materiais – seleção de processos [20]. Uma das áreas que enfatiza a relação

projeto-processos, mas também com triangulação limitada em relação à seleção dos materiais, é a denominada Projeto para Fabricação e Montagem *Design for Manufacturing and Assembly* (DFMA) [21-22].

Em relação à preservação ambiental, as ações na aviação têm sido em geral direcionadas para a redução de ruído, emissão de gases do efeito estufa, e promoção do descarte responsável das aeronaves no final do ciclo de vida [4, 6, 23-30].

No Brasil, que sedia uma das quatro maiores empresas aeronáuticas mundiais, o governo definiu em 2014 que o “avião verde” é uma das temáticas da política nacional de ciência e tecnologia [31]. Além disso, a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos deve fomentar ações para o descarte responsável [32].

Iniciativas específicas para interiores de aeronaves executivas têm tido como foco principal buscar aproximar o homem da natureza e lhe oferecer maior conforto. Como exemplo, pode-se citar o uso de cortiça no núcleo de placas de material composto para revestimento de teto e laterais, proporcionando maior conforto térmico e acústico, e menor vibração [33]. Outro exemplo é a utilização de materiais ecológicos e recicláveis, como fibras naturais, provenientes de práticas responsáveis e sustentáveis, em substituição aos materiais metálicos e plásticos [34]. Modificações nos materiais utilizados também têm sido motivadas por leis e regulamentações que restringem o uso de produtos químicos nocivos ao ser humano e ao meio ambiente [35].

Apesar dos materiais serem estratégicos na transição para a sustentabilidade dos interiores de aeronaves executivas, os guias de Projeto para o Ambiente (*Design for Environment*) que têm sido aplicados durante o desenvolvimento de aeronaves trazem apenas orientações gerais para a seleção dos materiais, relacionadas à redução do consumo de recursos e redução dos impactos ambientais [26]. As prioridades para minimização do impacto ambiental do produto relativas aos materiais utilizados são normalmente definidas a partir de estudos de análise de ciclo de vida [26, 36]. A realização desses estudos requer informações, não necessariamente existentes, sobre o desempenho ambiental dos materiais [37-39], a exemplo

dos para uso em interiores aeronáuticos, frequentemente formulados especificamente para atenderem ao requisito de inflamabilidade [14].

O atendimento ao conjunto das novas necessidades e desafios para que a fabricação de aeronaves executivas e seus interiores tenham sustentabilidade econômica, social e ambiental, requer uma reflexão e eventual mudança nos métodos de concepção e desenvolvimento de produto, buscando na seleção de materiais e processos o fortalecimento do produto e de sua manufatura. Para este fortalecimento, é importante combinar métodos que possam potencializar os resultados [40].

Especificamente para o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, que considerem a questão ambiental de maneira integrada com o projeto do produto e seus processos de fabricação, tem sido indicada a existência de lacunas em metodologias para identificação de prioridades na revisão dos materiais e processos atualmente utilizados [41]. Nesse sentido, a metodologia de Mapeamento de fluxo de valor, e os conceitos de manufatura enxuta associados, podem ser promissores tendo em vista que os mesmos têm sido empregados para integração da manufatura com as questões ambientais em diferentes tipos de produtos [42-46].

A presente pesquisa faz parte das atividades do Núcleo de Informação Tecnológica em Materiais (NIT/Materiais) na área aeronáutica. O NIT/Materiais desenvolveu pesquisas sobre manutenção aeronáutica em dois mestrados no Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Sociedade (PPGCTS) [47-48], além de um mestrado sobre a utilização de materiais no interior de aeronaves executivas no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) [9]. Este último foi importante motivador para o aprofundamento da pesquisa, agora em nível de doutorado, sobre a seleção de materiais para aeronaves executivas, juntamente com a experiência adquirida pela presente pesquisadora ao longo de 12 anos na indústria aeronáutica.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo da pesquisa é identificar parâmetros de referência para a prospecção e seleção de materiais e processos nas etapas iniciais de concepção do produto aeronáutico, visando melhorias econômicas e de sustentabilidade ambiental, e buscando contribuir para a maior integração projeto-materiais-processos. A hipótese central é que a orientação para incorporação destes requisitos nas etapas iniciais da seleção, conjuntamente e de modo integrado aos que hoje prevalecem hegemonicamente, pode fortalecer o projeto de aeronaves executivas em termos de melhor atendimento das expectativas do cliente e da sociedade. Isso pode também contribuir para a vantagem competitiva, para a sustentabilidade do produto e para a lucratividade dos fabricantes.

Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Mapear os atuais possíveis processos de fabricação de um componente de interiores de aeronaves executivas escolhido para análise, dos pontos de vista econômico e ambiental. Mapear o material considerado mais relevante deste componente, considerando as etapas do seu ciclo de vida;
- Analisar a situação atual para identificação de oportunidades de redução de perdas e melhorias ambientais. Identificar possíveis estratégias de projeto do produto, e requisitos para materiais e processos, para uso nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto;
- Explorar informações disponíveis em patentes sobre o interior de aeronaves, e conhecimentos e experiências de outros segmentos industriais similares, como interiores de embarcações e residências, que possam inspirar soluções em materiais e processos para interiores de aeronaves executivas;
- Analisar a possibilidade de expansão dos requisitos de materiais e processos, e as estratégias de projeto do produto identificadas no componente escolhido, para os demais componentes do interior. Para

isso, elaborar um procedimento metodológico de prospecção e seleção de materiais com consideração de aspectos ambientais e de redução de perdas, conjuntamente com os demais aspectos do projeto aeronáutico; e,

- Recomendar linhas de pesquisa em materiais e processos para interiores de aeronaves executivas.

## **2 SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA INTERIORES DE AERONAVES**

### **2.1 Materiais atualmente empregados em interiores de aeronaves**

Os materiais utilizados no interior de uma aeronave podem ser classificados basicamente em estruturais, de acabamento e de junção, conforme mostrado no Quadro 2.1.

Os materiais estruturais geralmente são ligas metálicas sólidas, majoritariamente de alumínio, e termoplásticos como polietersulfonas e polifenilssulfonas reforçadas com fibras de vidro ou carbono, e são utilizados em bases, trilhos e encostos de assentos. Painéis compostos com núcleo tipo colmeia de aramida, e faces de resina epóxi ou fenólica, reforçadas com fibra de vidro, ou ainda painéis com núcleo tipo colmeia de alumínio e faces de alumínio, são utilizados na fabricação de divisórias, portas e itens de mobiliário como toaletes, cozinhas, dormitórios, mesas de trabalho e refeições.

Os materiais de acabamento para utilização como revestimento do teto e laterais da aeronave são normalmente placas de material composto (resinas impregnadas com fibras em estruturas sólidas ou tipo colmeia) recobertas de tecido sintético ou filmes poliméricos. Para recobrimento das estruturas do mobiliário, de divisórias e de portas são utilizados uma grande variedade de laminados plásticos, laminados de madeira natural, couros, tecidos, espumas, vernizes e tintas. A escolha dos materiais de acabamento está associada principalmente ao tipo de uso da aeronave (comercial ou executiva, operação de taxi aéreo, uso corporativo ou individual) e aos aspectos culturais dos clientes (por exemplo, americanos, europeus, asiáticos etc).

Os materiais de junção são os elementos de fixação dos componentes estruturais, e os adesivos utilizados para colagem dos materiais de acabamento nos componentes estruturais. Na fixação dos componentes estruturais há predominância de adesivos epóxi e materiais metálicos na forma de pinos, insertos, dobradiças, parafusos. Para a colagem dos materiais de

acabamento são comuns os adesivos poliuretânicos, resorcinol e borrachas tipo policloropreno.

Quadro 2.1 Principais materiais atualmente em uso para produzir componentes do interior de aeronaves.

Aplicação do material	Materiais para os componentes do interior	Referências
Estruturas do interior	<u>Revestimento de teto e laterais:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Painel com núcleo tipo colmeia de aramida e faces de resina fenólica reforçadas com fibras de vidro ou carbono.</li> </ul>	[14]
	<u>Móveis (gabinetes, portas e divisórias) e estruturas de piso:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Painéis sanduíche:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faces: ligas de alumínio, resina epóxi ou fenólica reforçada com fibra de vidro, carbono ou aramida.</li> <li>- Núcleo: estruturas tipo colmeia de ligas de alumínio ou aramida.</li> <li>- Resinas para preenchimento de contornos de peças ou reforço em regiões de colmeia: epóxi.</li> </ul> </li> </ul>	[14-15,49]
	<u>Estruturas de assentos:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ligas de alumínio.</li> <li>• Termoplásticos como polietersulfonas e polifenilssulfonas, reforçadas com fibras de vidro ou carbono.</li> </ul>	[13]
Junção estrutural	<u>União de componentes estruturais:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adesivos tipo epóxi.</li> <li>• Ligas de alumínio ou aço (pintadas, cromadas, anodizadas, folheadas a ouro etc.).</li> </ul>	[50-53]
Acabamento das estruturas	<u>Revestimento de estruturas de teto, paredes laterais, móveis e assentos:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecidos naturais de algodão ou lã, tecidos sintéticos e couro natural ou sintético.</li> <li>• Termoplásticos decorativos como poli-fluoreto de vinila ou poli-cloreto de vinila.</li> <li>• Laminados de madeira natural e pranchas de madeira recobertas com vernizes tipo poliuretânicos, poliéster ou acrílicos.</li> <li>• Laminados tipo fórmica (papel decorativo tratado com resina melanina sobre folhas de papel tipo <i>kraft</i> impregnadas com resina fenólica) .</li> <li>• Tintas poliuretânicas a base de água ou solvente.</li> <li>• Espumas de polietileno ou poliuretânicas.</li> </ul> <u>Revestimento de piso:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carpetes de nylon, lã, poli-cloreto de vinila.</li> <li>• Laminados de rocha.</li> </ul>	[12,14,16, 18,54-60]
Colagem de acabamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adesivos a base de resinas epóxi, poliuretano, resorcinol ou neoprene. Em sistemas à base de água ou solvente.</li> </ul>	[15,49-50, 61]

Fonte: [62].

Para as aeronaves executivas, o mobiliário é um dos componentes mais importantes pela possibilidade de interferência do cliente para personalização conforme suas demandas estéticas e de estilo. É constituído por divisórias, armários, toaletes, mesas e assentos, como ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 Elementos de mobiliário do interior de aeronaves executivas.



(a) Armário de cozinha (*galley*)



(b) Assentos, mesa, armário e divisórias



(c) Assentos, mesas e divisórias

Fonte: [63]

Os grupos de materiais mais comuns atualmente utilizados para a confecção do mobiliário de aeronaves executivas são:

- Painéis sanduíche com núcleo de aramida em forma de colmeia, e faces de resina fenólica ou epóxi, reforçadas com fibra de vidro;
- Painéis sanduíche com núcleo de alumínio em forma de colmeia e faces de alumínio;
- Ligas de alumínio, aço e outros metais não ferrosos;
- Resinas epóxi;

- Filmes termoplásticos;
- Laminados tipo fórmica (papel decorado, tratado com resina melanina, sobre base de folhas de papel tipo *kraft* impregnadas com resina fenólica);
- Folheados de madeira com posterior aplicação de verniz;
- Madeira maciça com posterior aplicação de verniz;
- Tintas e vernizes a base solvente ou à base de água (poliuretânicas, acrílicas e poliésteres);
- Tecidos e couro naturais, ou sintéticos em rayon, poliéster, poliuretano;
- Adesivos epóxi e policloropreno diluídos em solventes ou água;
- Componentes plásticos em acrílico, poli-fluoreto de vinila, *teflon* (politetrafluoretileno), policarbonatos, espumas de poliuretano; e,
- Peças em metal cromado, escovado, acetinado, banhado a ouro, anodizado, com pintura etc.

Todos esses materiais devem atender aos requisitos para fogo, fumaça e emissão de gases tóxicos [14]. Além desses principais requisitos obrigatórios, é importante que os materiais tenham baixo peso, o que os diferencia para uso em interiores de aeronaves em relação a outros materiais que podem ser empregados em mobiliário de uso residencial, incluindo móveis para escritórios, hotéis etc.

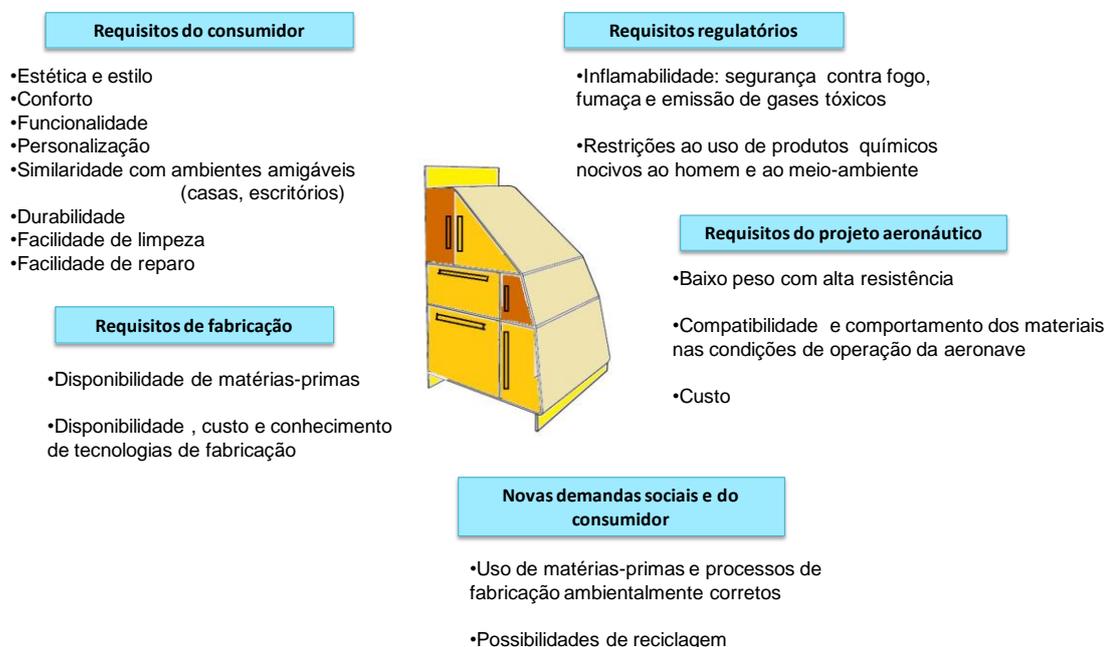
Embora os materiais de acabamento utilizados (laminados de madeira ou sintéticos, couros, tecidos, vernizes e tintas) possam ser basicamente do mesmo tipo daqueles utilizados na indústria de mobiliário residencial, sua formulação é frequentemente ajustada para atender aos requisitos de inflamabilidade. Este fator limita significativamente a variedade de opções no projeto e exige desenvolvimentos por parte dos fornecedores de matérias-primas em colaboração com os fabricantes aeronáuticos. Em relação ao requisito peso, o diferencial da aviação está nos materiais de sustentação, formados por painéis sanduíche com núcleo tipo colmeia que substituem as pranchas de madeira maciça e os painéis de madeira reconstituída (como compensados, aglomerados, MDF) [64].

Os principais requisitos que direcionam a prospecção e seleção de materiais e processos para interiores de aeronaves executivas podem ser subdivididos em cinco famílias, como apresentado na Figura 2.2 [9, 14, 65]:

- Requisitos do consumidor
- Requisitos regulatórios
- Requisitos de fabricação
- Requisitos do projeto aeronáutico
- Novas demandas sociais e do consumidor

Dentre esses requisitos, além da inflamabilidade e do baixo peso, podem ser destacados os relativos à personalização, estética, conforto e estilo, às restrições ambientais, à compatibilidade dos materiais nas condições de uso da aeronave e à disponibilidade de matérias primas.

Figura 2.2 Requisitos para a seleção de materiais e processos no projeto de interiores aeronáuticos.



Fonte: Elaboração pela autora a partir de [9, 14, 65].

As temáticas da **personalização, estética e estilo** podem ser sumarizadas sob os dois seguintes aspectos [66]: o primeiro está na possibilidade de adaptação dos materiais de acabamento em função das preferências estéticas de diferentes mercados consumidores (América do norte, Europa, Ásia, Oriente Médio, África etc.); e, o segundo, na modularidade do mobiliário, que possibilite seu espaço interno ser adaptado para diferentes necessidades, e/ou ser instalado em diferentes locais da aeronave.

Em relação às **questões ambientais**, além da sinalização pela demanda de um produto aeronáutico ambientalmente mais amigável [5], regulamentações em diversos países têm restringido o uso de produtos químicos nocivos ao ser humano e ao meio ambiente, e definindo critérios para descarte dos materiais no final do ciclo de vida do produto [32, 35].

A complexa relação entre as **propriedades dos materiais e o desempenho do produto quando materiais são utilizados em conjunto** [67], associada às condições extremas de uso das aeronaves em termos de variação de temperatura, umidade e pressão, pode implicar na escolha de materiais que resulte em produtos susceptíveis a deterioração durante o uso, com conseqüente impacto na avaliação do cliente. Exemplos de defeitos devido à inadequada escolha e aplicação dos materiais são empenamentos, descolamentos, e alterações estéticas do acabamento devido a reações químico-físicas do pacote de materiais estrutura x adesivo x acabamento.

As inúmeras restrições ao uso de materiais em interiores de aeronaves, e o relativo baixo volume de produção comparado aos materiais similares utilizados na fabricação de mobiliário para outros fins que não o aeronáutico, resulta no atual **uso de poucos e consolidados materiais**, restritos a poucos fornecedores [9]. Deste modo, a incorporação de novos materiais e processos para o mobiliário aeronáutico frequentemente implica na necessidade de investimento em pesquisa e desenvolvimento, por parte dos fabricantes e também dos fornecedores de matérias-primas.

Essas restrições tornam complexo o processo de seleção de materiais, e trazem a necessidade do emprego de metodologias que facilitem a análise dos elementos do projeto do mobiliário de forma integrada, para escolhas que

resultem em um produto que atenda às demandas do consumidor e da sociedade, com custos que possibilitem competitividade para o fabricante.

## **2.2 Seleção de materiais e processos no desenvolvimento do produto**

A seleção de materiais e processos, no ambiente industrial aeronáutico, está inserida no contexto do desenvolvimento de produtos, e envolve atividades interdisciplinares entre as áreas de projeto, materiais, manufatura, finanças, jurídico, vendas, marketing e outras. Essa abordagem interdisciplinar e complexa é necessária porque, além de satisfazer aos rigorosos requisitos técnicos, o produto deve ser esteticamente agradável, fácil de usar, economicamente competitivo e em conformidade com regulamentações de diversas naturezas, como aeronáuticas e ambientais.

Para abordar o desenvolvimento de produto, Farag [68] propõe sua subdivisão em sete etapas, cada uma delas abrangendo atividades de seleção ou substituição de materiais e processos de maneira direta ou indireta, conforme Quadro 2.2. Ashby [69] e Rozenfeld et al. [70] relacionam atividades de seleção de materiais e processos às etapas de desenvolvimento do produto, porém concentrando a visão na etapa de detalhamento do produto (segunda etapa no Quadro 2.2), na qual estas atividades são consideradas mais intensas. Rozenfeld et al. [70] reforçam a importância das decisões - escolhas de alternativas - no início do desenvolvimento do produto, como fator determinante do custo nas futuras possibilidades de mudança e, também como outros autores, sugerem metodologias para identificação de necessidades e seleção de alternativas. Metodologias como Desdobramento da Função Qualidade (QFD), Análise de Valor, Análise de Falha (FMEA), e Projeto para Fabricação e Montagem (DFM/DFA), podem ser empregadas não somente no desenvolvimento do produto como um todo, mas também podem contribuir de maneira particular para a seleção de materiais e processos. Estas metodologias podem constituir-se em importante estratégia para intersecção entre produto e seleção de materiais em termos de análise do atendimento a

requisitos, de comunicação e intercâmbio de informações e conhecimentos entre integrantes de equipe, de tomada de decisão etc.

No pré-desenvolvimento do produto (primeira etapa do Quadro 2.2) prevalecem às técnicas de prospecção tecnológica e inteligência competitiva para identificar claramente as demandas dos potenciais clientes, e a viabilidade técnica e mercadológica dos produtos e/ou serviços, de modo a reduzir as incertezas [71-72].

Na segunda etapa, de detalhamento do produto, a atividade de conceituação tem a predominância de métodos qualitativos, tanto para identificar a função e os requisitos primários e secundários de cada peça, quanto para relacionar os requisitos de cada peça a requisitos do produto, de materiais e de processos. Para identificar funções e requisitos empregam-se diagramas de funções e análises de valor [68-69, 73]. Para relacionar requisitos emprega-se, por exemplo, QFD [72, 74-75], ou a Determinação do Coeficiente de eficiência do material a partir da função, objetivo e restrições do componente [69]. Existem ainda guias de projeto que são conhecidos genericamente por *Design for "X"* (DFX), onde X pode ser = manufatura, montagem, qualidade, reciclagem, custo, ciclo de vida, meio ambiente, desmontagem, manutenção, modularidade etc.; também utilizados para apoio à tomada de decisões e análise de seus impactos nas etapas posteriores ao desenvolvimento, de fabricação, uso e descarte do produto [70, 76]. A atividade de conceituação no desenvolvimento de produto tem seu foco nos requisitos primários e no custo das soluções para a escolha dos materiais e processos [68-70, 77, 89] e, segundo Karana et al. [78], mais recentemente tem sido incorporada a análise de necessidades relativas ao impacto ambiental do produto [38, 80-82, 89].

Na atividade de configuração/personalização do produto, ainda nesta segunda etapa de detalhamento do produto, prevalecem os métodos semi-quantitativos para selecionar poucos e viáveis materiais e processos. Consideram-se aqui os requisitos secundários, aspectos estéticos, de forma do produto, e também aqueles relacionados ao impacto ambiental [68-69, 77, 83-84].

Na última atividade da segunda etapa, de detalhamento do projeto e escolha da solução, são aplicados métodos específicos para análise de desempenho das soluções, por exemplo, análise de falhas [70, 85] ou análise de elementos finitos [69]. Nesta etapa também são empregadas técnicas para otimização do produto/processo e para análise detalhada do custo/ benefício [68-69, 72, 76, 85-88]. Também são consideradas a disponibilidade de fornecimento de materiais e a experiência no uso dos materiais e processos pré-selecionados [69].

Nas etapas de testes e fabricação do produto piloto (respectivamente etapas 3 e 4), o desempenho dos materiais e processos pode ser avaliado e ajustado com o apoio de métodos para análise de falhas, como o FMEA [70, 85].

Durante a etapa 7, do ciclo de vida do produto até sua retirada de serviço, as mesmas metodologias aplicadas na etapa 2 podem ser novamente utilizadas para a substituição de materiais e processos, visando prolongar o ciclo de vida. Neste caso, com a vantagem de se ter o produto atual para comparação, com informações precisas sobre desempenho, custo e motivação para a mudança [68, 90]. A motivação para a mudança é normalmente devida às exigências de regulamentações, e às necessidades de redução de custos ou de melhorias da qualidade e desempenho, com vistas ao aumento ou manutenção da competitividade e da margem de lucro.

Quadro 2.2 Principais etapas, atividades e metodologias do desenvolvimento de produtos e da seleção de materiais e processos.

Etapas de desenvolvimento do produto	Atividades relacionadas ao desenvolvimento do produto	Atividades relacionadas à seleção de materiais e processos	Metodologias que podem contribuir	Parâmetros de materiais e processos considerados
<p><b>Etapa 1:</b></p> <p><b>Pré-desenvolvimento do produto</b></p> <p>Identificar necessidades, estudar viabilidade e selecionar conceito [68-69]</p> <p>Pré-desenvolvimento e projeto informacional [70].</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traduzir as ideias de marketing para o projeto industrial: O que é? O que faz? Como ele faz isso? Quanto deveria custar?</li> <li>• Formular as especificações do produto, desenvolver vários conceitos e selecionar o melhor [68].</li> <li>• Definir precisamente as necessidades a partir do mercado ou de novas ideias. Para evitar limitação do pensamento por ideias pré-concebidas, esta definição não deve contemplar a solução [69].</li> <li>• Planejar estrategicamente os produtos: consolidar informações sobre tecnologia e mercado, e propor estratégias para o portfólio de produtos. Definir o escopo do produto com parâmetros básicos que o caracteriza (o que é?), e as funcionalidades que dele se espera (para que serve?) .</li> <li>• Detalhar o ciclo de vida do produto e definir seus clientes.</li> <li>• Identificar os requisitos dos clientes do produto; definir requisitos do produto.</li> <li>• Definir especificações-meta do produto; avaliar sua viabilidade econômica [70].</li> </ul>	<p>Para conceitos inovadores, identificar novas possibilidades de materiais e processos nos estágios iniciais [69].</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicas de prospecção tecnológica e inteligência competitiva para materiais e processos [71].</li> <li>• Análise de atratividade (baseada em conceitos de análise do valor, e que considera fatores mercadológicos e da estratégia competitiva da empresa) [72].</li> <li>• Matriz de atributos, QFD, análise paramétrica, <i>checklists</i>, análise matricial, diagrama de Mudge [70].</li> </ul>	<p>Toda a gama possível de materiais e processos [68-69].</p>

<p><b>Etapa 2: Detalhamento do produto</b></p> <p>Detalhar projeto e selecionar materiais e processos</p> <p>Processo iterativo dividido em etapas:</p> <p>Projeto conceitual, configurado e detalhado [68-69].</p> <p>Ou projeto conceitual e detalhado [70].</p>	<p><b>Projeto preliminar e conceitual:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Decompor o produto em submontagens;</li> <li>Identificar a função principal de cada parte e seus requisitos críticos (primários e secundários) [68].</li> <li>Definir a especificação;</li> <li>Determinar a estrutura funcional;</li> <li>Selecionar procedimentos de trabalho;</li> <li>Avaliar e selecionar conceitos. [69].</li> </ul> <p>Gerar e selecionar a concepção do produto a partir das especificações-meta;</p> <p>Definir arquitetura do produto: sistemas, subsistemas e componentes (arquitetura modular para minimizar modificações físicas necessárias e facilitar o processo de evolução tecnológica, ou alterações na fabricação (custos, padronização), manutenção, reciclagem etc.);</p> <p>Identificar os parâmetros críticos de funcionamento do produto em seus sistemas, subsistemas e componentes para conhecer e selecionar os materiais;</p> <p>Definir plano do macro processo e métodos de processamento;</p> <p>Para a seleção da concepção do produto, uso de matrizes de decisão. [70].</p>	<p><b>Análise dos requisitos de desempenho do produto e geração de soluções alternativas de materiais e processos para o conceito escolhido.</b></p> <p><b>Triagem inicial</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Usar os requisitos críticos de cada parte para definir os requisitos de desempenho do material (primários e secundários).</li> <li>Iniciar com todos os materiais disponíveis e estreitar as opções com base nos requisitos primários (rígidos) [68].</li> </ul> <p><b>Modelar a função.</b></p> <p><b>Estudar viabilidade.</b></p> <p><b>Análises para aproximar as opções de materiais e processos [69].</b></p>	<p><b>Gerar e selecionar concepção a partir das especificações-meta:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Métodos intuitivos: <i>brainstorming</i>, <i>brainwriting</i>, <i>lateral thinking</i>, <i>synetics</i> ou <i>sinergia</i>, <i>galeria</i>.</li> <li>Métodos sistemáticos: morfológico, análise e síntese funcional, analogia sistemática, <u>análise do valor</u>, questionários e <i>checklists</i></li> <li>Métodos orientados: TRIZ ou TIPS (teoria da solução de problemas inventivos), SIT [70].</li> </ul> <p><b>Identificação da função de cada parte</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Diagramas de funções [69].</li> <li>Análise do valor [72].</li> </ul> <p><b>Requisitos de desempenho dos materiais e processos (desdobramento a partir dos requisitos do produto)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Coefficiente de eficiência do material ou índice do material [69].</li> <li>DFX (incluindo DFM, DFA) [70].</li> </ul> <p><b>Triagem inicial e identificação de alternativas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Custo por unidade [68];</li> <li>Cartas de Ashby [69];</li> <li>Softwares [69];</li> <li>Experiência de especialistas internos nas empresas [68-69];</li> <li>Análise de valor no ciclo de vida [80];</li> <li>Método do conteúdo de energia dos materiais [79, 81];</li> <li>Cartas de Ashby (considerando aspecto ambiental: eco indicadores) [82];</li> <li>Matriz de decisão com peso para os critérios [70];</li> <li>TOPSIS [77]</li> </ul>	<p><b>Requisitos primários</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Propriedades físicas e químicas dos materiais;</li> <li>Processos de fabricação para transformação dos materiais, e obtenção da forma desejada de maneira genérica (pode incluir tamanho de lote, taxa de produção, forma e tamanho do produto, tolerâncias e acabamento superficial).</li> </ul> <p><b>Custo (material + processo) por propriedade</b> [68-69].</p> <p><b>Aspectos ambientais</b> [79-82].</p>
--	--	--	--	---

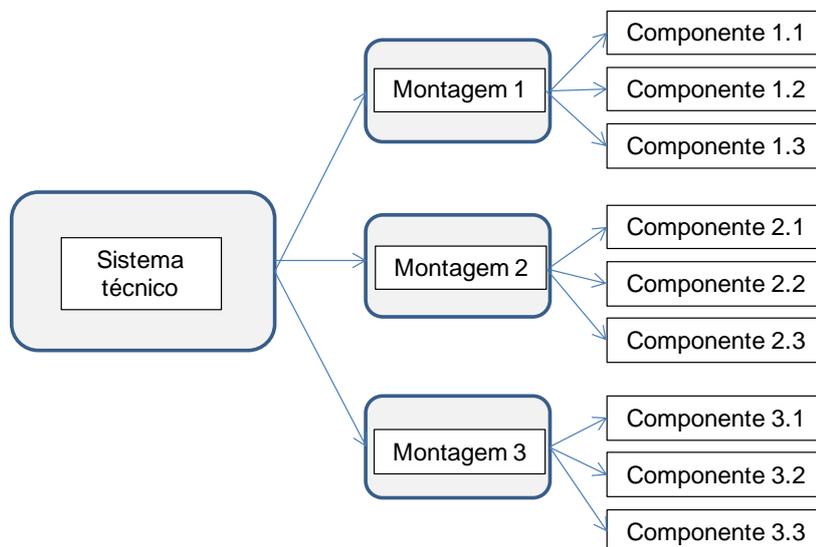
<p><b>Etapa 2</b> <b>Detalhamento do produto</b></p>	<p><b>Configuração/ personalização do projeto:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Especificar qualitativamente cada peça com ordem de magnitude das principais dimensões e recursos (paredes, furos, encaixes etc.) [68].</li> <li>• Desenvolver layouts para o produto (escala, forma);</li> <li>• Modelar e analisar montagem;</li> <li>• Aperfeiçoar funções;</li> <li>• Avaliar e selecionar layout [69].</li> </ul>	<p><b>Comparação de soluções alternativas</b> Uso de requisitos mais brandos para estreitar o campo de possíveis materiais, selecionando poucos ótimos candidatos [68].</p> <p><b>Seleção preliminar de materiais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Escolha materiais que irão suportar as faixas de tensão, temperatura e pressão sugeridas por análise, ou requeridas na especificação, examinando implicações em desempenho e custo.</li> <li>• Alta precisão nas informações técnicas sobre os materiais [69].</li> </ul>	<p><b>Métodos semi- quantitativos de comparação de soluções alternativas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Método de ponderação de propriedades [68].</li> <li>• TOPSIS [77]</li> <li>• Método de índice de desempenho [68].</li> <li>• Método de lógica digital [83].</li> <li>• Processo de hierarquia analítica [84].</li> <li>• Método de limites nas propriedades [68].</li> <li>• Análise de valor no ciclo de vida [83].</li> <li>• Avaliação do ciclo de vida [89]</li> <li>• Custo no ciclo de vida [89]</li> </ul>	<p><b>Forma do produto:</b> detalhamento de seções e impacto na seleção dos materiais [68- 69].</p> <p><b>Requisitos secundários:</b> características sujeitas a compromisso, (propriedades físico-químicas e custo) [68].</p> <p><b>Aspectos estéticos, de apelo para o consumidor:</b> padrão, cor, textura etc. [69].</p> <p><b>Aspectos ambientais</b> <b>Custo</b> [89]</p>
<p><b>Detalhamento/parametrização do design:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar as dimensões e funcionalidades de cada peça baseados em materiais e processo de manufatura específicos, levando em conta limitações de projeto, de manufatura, de peso, de espaço;</li> <li>• Considerar detalhadamente os custos;</li> <li>• Gerar detalhamento de projetos alternativos e avaliação conforme requisitos [68].</li> <li>• Analisar os componentes em detalhe;</li> <li>• Selecionar a rota de processo;</li> <li>• Otimizar desempenho e custo;</li> <li>• Preparar desenhos detalhados [69].</li> <li>• Criar e detalhar sistemas, subconjuntos e conjuntos;</li> <li>• Decidir entre comprar ou fabricar, e planejar processo de fabricação e montagem;</li> <li>• Criar material de suporte.</li> <li>• Aperfeiçoar produto e processo.</li> </ul>	<p><b>Seleção da ótima solução</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Usar os ótimos materiais e processos de manufatura para detalhar o projeto;</li> <li>• Comparar combinações alternativas levando em consideração o custo;</li> <li>• Selecionar a ótima combinação de projeto, material e processo de manufatura [68].</li> <li>• Analisar o desempenho dos materiais em componentes críticos (com informações precisas e comparando a mesma matéria-prima produzida por diferentes fornecedores);</li> <li>• Aplicar métodos de otimização em componentes ou grupos de componentes para maximizar o desempenho;</li> <li>• Escolher a geometria final e material de fabricação;</li> <li>• Analisar o processo de produção e custear o projeto [69].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo benefício.</li> <li>• DFX para otimização de projeto e processo, e planejamento do fim de vida do produto [68-70, 76] <i>Lean Design</i> [98].</li> <li>• 3P: Preparação do processo produtivo [88].</li> <li>• Análise de elementos finitos [69].</li> <li>• Análise das potenciais falhas de projeto e processo (FMEA). [70, 85].</li> </ul>	<p><b>Condições locais:</b> equipamentos e experiência interna para utilização dos materiais e processos selecionados, disponibilidade de matérias-primas e fornecedores [69].</p> <p><b>Aspectos de manufatura:</b> critérios para facilitar fabricação e montagem [68-70, 75, 85-88].</p> <p><b>Custos x benefícios detalhados</b></p>	

<p><b>Etapa 3</b> <b>Testar e refinar</b> [63] Preparação para a produção [65].</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricar protótipos [68].</li> <li>Planejar, fabricar e montar de protótipos para o programa de testes, tendo em mãos o levantamento das possíveis falhas identificadas no FMEA de produto/processo [70].</li> </ul>	<p>Verificar o desempenho dos materiais selecionados e fazer ajustes [68].</p>	<p>Análise das potenciais falhas de projeto (FMEA) [72, 85].</p>	-
<p><b>Etapa 4</b> <b>Fabricar produto</b> [63].</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piloto em escala industrial [68].</li> <li>• Produção piloto, identificação da capacidade do processo, e análise das possíveis falhas identificadas no FMEA de processo [70].</li> </ul>	<p>Verificar o desempenho dos processos selecionados e fazer ajustes [68].</p>	<p>Análise das potenciais falhas de processo (FMEA) [70, 85].</p>	-
<p><b>Etapa 5</b> <b>Lançar produto</b> [63]. Lançamento do produto [65].</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prover recursos e especificar processo para as áreas de manufatura. Preparar serviços pós-venda, manutenção, procedimentos para instalação e utilização do produto [68].</li> <li>• Preparar manuais de manutenção, aplicação, catálogos para venda [70].</li> </ul>	-	-	-
<p><b>Etapa 6</b> <b>Vender produto</b></p>	-	-	-	-
<p><b>Etapa 7</b> <b>Ciclo de vida e plano para retirada de serviço</b> [63]. Acompanhar produto/ processo e descontinuar produto [65].</p>	<p><b>Identificação da necessidade de substituição (forças motrizes):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Competitividade, atendimento a requisitos legais, ambientais [68, 90].</li> <li>• Demandas de mercado, necessidade de redução de custos, possibilidade de uso de novos materiais, pressões ambientais [69].</li> <li>• Integrar as questões ambientais no contexto do pós-desenvolvimento e relacioná-las com a etapa de desenvolvimento (Ecodesign).</li> <li>• Propor mudanças ou melhorias incrementais para estender o ciclo de vida [70].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação dos motivadores de mudança.</li> <li>• Auditoria no material atual.</li> <li>• Definição dos requisitos de desempenho [68, 90].</li> </ul>	-	-

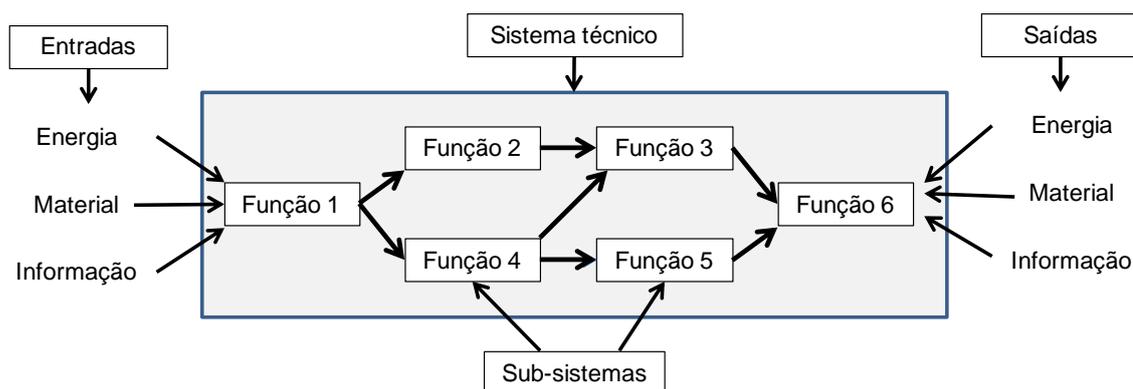
Fonte: Elaboração pela autora

No projeto preliminar e conceitual de um produto complexo, uma atividade inicial importante que antecede a identificação de funções de cada parte do produto, é a decomposição ou divisão do produto em submontagens ou subsistemas, e a definição da estratégia de fabricação. Pode-se optar por uma maneira de fabricação exclusiva para o produto almejado ou por uma alternativa padrão já empregada anteriormente para outros produtos [68]. Na visão de Ashby [69], esta divisão em montagens, sub-montagens e componentes, ilustrada na Figura 2.3 (a), embora seja útil para analisar um produto existente, é insuficiente para analisar todo o processo de desenvolvimento de um novo produto, e propõe uma estruturação baseada em entradas, fluxos e saídas de cada subsistema, conforme Figura 2.3 (b). O autor considera que esse procedimento analítico permite uma melhor visualização da estrutura de funções do sistema, e das subdivisões e interligações entre elas, tornando mais eficiente a análise das opções de projeto, inclusive sob o ponto de vista das alternativas de materiais e processos.

Figura 2.3 Desdobramento do produto para análise de funções.



(a) Desdobramento do sistema



(b) Funcionamento do sistema

Fonte: [69].

A identificação dessas soluções alternativas de materiais e processos para cada peça do produto deve ter como ponto inicial todos os possíveis materiais de engenharia factíveis e, somente após a identificação da função de cada componente ou subsistema, é que os requisitos críticos de desempenho podem ser determinados e desdobrados em requisitos para os materiais e processos de manufatura. Essa atividade envolve esforço multidisciplinar, com a ponderação de vários pontos de vista e uso de conhecimento técnico aliado a criatividade, podendo resultar em possibilidades excessivamente restritas caso haja bloqueio do pensamento criativo associado à forma física da peça, ou a conceitos cristalizados dos produtos ou serviços existentes. Uma forma de contornar os possíveis bloqueios é a abordagem funcional, baseada na metodologia de análise do valor [73, 91].

A análise do valor se baseia na focalização sobre as funções dos produtos, ao invés de focalizar as suas peças ou componentes, e sobre os custos, que podem em parte ser inúteis tanto no produto em si, como nos procedimentos ou nos processos envolvidos. Como um dos elementos fundamentais da análise de valor, a abordagem funcional considera a função como a natureza essencial de uma finalidade, e todo objeto ou toda ação, para existir, deve ter uma finalidade. A função é definida por um verbo somado a um substantivo, e deve ser classificada: - nas dimensões de uso ou estima por um substantivo mensurável ou não; - como uma função primária ou secundária; e, - como necessária ou desnecessária. Tomando como exemplo a aplicação de

vernizes em laminados de madeira utilizados como material de acabamento nos móveis de aeronaves executivas, conforme mostrado no Quadro 2.3, uma função do verniz é proteger a madeira, função primária de uso, que também valoriza a estética como outra função primária de estima, ambas necessárias. Nesse exemplo, a análise funcional pode ainda indicar que atividades adicionais na aplicação do verniz para corrigir imperfeições da madeira são desnecessárias, visto que as imperfeições podem valorizar a estética do produto, pelo fato da madeira ser um produto natural com características exclusivas. Esta atividade adicional, quando realizada, acrescenta custo ao produto sem aumentar o valor estético, ao contrário, podendo diminuir o mesmo. A partir da análise das funções primárias e necessárias do produto também é possível avaliar formas alternativas para desempenho das funções, sem os bloqueios criativos associados ao produto ou a conceitos cristalizados.

Quadro 2.3 Exemplo da abordagem funcional para o material verniz utilizado como acabamento sobre laminados de madeira no interior de aeronaves executivas.

<b>Função do verniz (verbo + substantivo)</b>	<b>Uso ou estima?</b>	<b>Primária ou secundária?</b>	<b>Necessária ou desnecessária?</b>
PROTEGER + MADEIRA	USO	PRIMÁRIA	NECESSÁRIA
VALORIZAR + ESTÉTICA	ESTIMA	PRIMÁRIA	NECESSÁRIA
CORRIGIR + IMPERFEIÇÕES	ESTIMA	SECUNDÁRIA	DESNECESSÁRIA

Fonte: Elaboração pela autora

Novas abordagens da análise do valor que ampliam ou modificam o seu escopo em relação à redução de custos, ou na manutenção dos custos com aumento do valor percebido pelo cliente, têm sido apresentadas. Um exemplo é a inserção do foco ambiental para redução das emissões de carbono geradas durante a fabricação e uso de produtos [92].

### 2.3 Abordagens para redução de perdas na fabricação

No detalhamento do produto, após a triagem inicial e comparação de alternativas, a seleção otimizada dos materiais e processos requer informações de alta qualidade e adequadamente manipuladas [93]. A melhor combinação projeto-materiais-processos deverá garantir o desempenho das funções necessárias do produto de modo eficiente, e ser economicamente viável. A solução escolhida deve atender aos requisitos legais, sociais, de segurança, ambientais e de confiabilidade, de uma maneira preferivelmente mais vantajosa em relação aos concorrentes. A decisão final, após o detalhamento das soluções candidatas, pode ser tomada a partir de uma análise do tipo custo x benefício, mas a obtenção de ganhos significativos em desempenho e custo dependerá da integração efetiva entre projeto, materiais e processos [94].

Para a integração dos fatores envolvidos na relação projeto-materiais-processos no desenvolvimento do produto, a abordagem comumente encontrada na literatura específica sobre seleção de materiais e processos se concentra nas relações entre: - propriedades do material x função do material no componente; e, - forma do componente x atributos do processo, como tolerâncias, geometrias, tamanho de lote, taxa de produção e custo [69]. Entretanto, outros aspectos além destes devem ser considerados para maximizar os benefícios desta integração [22], principalmente em relação à maneira como os diversos processos, materiais e matérias-primas interagem entre si durante a fabricação do produto. Por exemplo, combinações de projeto, materiais e processos que possibilitem: - fluxos de produção contínuos, sem refluxos ou formação de estoques intermediários; - baixos volumes de estoque de matérias-primas; - configuração do produto para o cliente o mais tarde possível para reduzir o tempo entre o pedido e o fornecimento; - facilidade de nivelamento de carga de trabalho ao alternar a fabricação de produtos em uma linha de montagem; - flexibilidade para absorver alterações de personalização do produto, além de outros. Todos estes aspectos relevantes para a otimização da manufatura são em geral pouco abordados no desenvolvimento do projeto do produto, e normalmente ajustados com limitações durante a etapa de

produção [19]. Apesar da incipiência de informações sobre essa temática no âmbito da engenharia de materiais, uma das metodologias que se destaca na aproximação dos elementos projeto-processos é o **Projeto para fabricação e montagem (DFMA)**.

A abordagem do DMFA se baseia na concepção do produto de modo a facilitar montagem e maximizar o uso dos processos de fabricação, com menores custos, maior robustez e qualidade, sem prejuízo de outros propósitos e das funcionalidades. Suas origens remontam nos conceitos de intercambiabilidade de Eli Whitney (1765), de produção em massa de Henry Ford (1863), e de análise do valor de Lawrence Miles (1904). O DFMA faz uso de conhecimentos existentes, originários da experiência de manufatura em fatores que auxiliam ou prejudicam a produtividade no ambiente de fábrica, e estabelece princípios a serem considerados na etapa de detalhamento do conceito do produto [21, 76].

A aplicação da metodologia DFMA é tipicamente realizada em duas etapas [22]. Na primeira etapa é avaliado o projeto para montagem (DFA), considerando princípios como minimização do número de peças, padronização de componentes, minimização dos níveis de montagem e minimização da necessidade de ajustes. Na etapa seguinte, para o melhor conceito são avaliados princípios para fabricação (DFM), como utilizar tolerâncias o mais abertas possível, evitar peças com rebaxos e cantos vivos, reduzir ou eliminar elementos de fixação, e permitir o efeito das tensões térmicas.

A metodologia DFMA possui interface com a seleção dos materiais com recomendações genéricas, como a necessidade de evitar o uso de materiais comprados em lotes fabricados especialmente para a aplicação, reduzir o número de diferentes materiais no componente, utilizar materiais bem conhecidos para evitar incertezas, utilizar materiais que combinem mais de uma propriedade, que melhor se adequam aos processos de fabricação, disponíveis e de menor custo aceitável. No entanto, o conhecimento específico da seleção nos casos reais, para grande parte dos produtos, geralmente está restrito à experiência e à prática da engenharia nas organizações, pouco acessível na literatura técnica [22].

Uma metodologia que pode auxiliar no levantamento de conhecimentos fortemente associados à experiência e à prática industrial na intersecção projeto-materiais-processos é o **Mapeamento de fluxo de valor** (MFV), que permite considerar os processos de fabricação, tanto isoladamente, quanto de maneira combinada e abrangente na manufatura [19]. O MFV tem sido muito utilizado para avaliar processos de produção em operação e identificar desperdícios e oportunidades de otimização, mantendo o foco nas necessidades e desejos dos clientes.

Embora a aplicação usual do MFV seja na manufatura em andamento, esta metodologia pode eventualmente auxiliar na identificação de requisitos para materiais e processos durante o desenvolvimento de produto, combinada a outras tradicionalmente utilizadas, sendo particularmente útil em processos de manufatura envolvendo linhas de produção nas quais possa haver grande potencial de ganhos no uso mais eficiente das matérias-primas. O melhor estabelecimento do processo de manufatura durante o desenvolvimento do produto, de maneira integrada aos demais elementos de decisão, pode trazer ganhos expressivos, mesmo que isso aumente o custo desse desenvolvimento. O projeto do produto representa em média 5% do custo final do produto, mas influencia cerca de 70% deste custo, que inclui a manufatura [95].

O Mapeamento de fluxo de valor auxilia na identificação do que realmente agrega valor para o cliente, dos desperdícios e das oportunidades de otimização nos processos de fabricação. É uma das formas de aplicação do conceito de Pensamento Enxuto ou *Lean Thinking* [96]. Este conceito foi desenvolvido na indústria automobilística japonesa a partir da segunda guerra mundial, e disseminado no ocidente a partir da década de 90 com as publicações “*The machine that Changed the World*” (Womack, Jones & Roos, 1990) [97] e “*Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*” (Womack & Jones, 1998) [98].

O princípio básico do pensamento enxuto é avaliar o processo de fabricação de um componente, ou o fornecimento de um serviço, classificando suas atividades em três tipos [98-99]:

- **Atividades que agregam valor**, sendo aquelas que aos olhos do cliente tornam o produto ou serviço mais valioso;
- **Atividades que não agregam valor, mas necessárias**, pois, **devido ao nível tecnológico atual**, não podem ser removidas a não ser que o processo atual mude radicalmente, e;
- **Atividades que não agregam valor e desnecessárias, classificadas em 7 tipos de desperdício**: defeitos, excesso de produção, estoques, processamento desnecessário, movimentos desnecessários, transporte desnecessário, e espera por fatores como falta de estoque ou gargalos no processamento.

A eliminação dos desperdícios puros e das atividades necessárias que não agregam valor, e conseqüente redução dos tempos de fabricação, são metas constantes do princípio do pensamento enxuto. O tempo é um importante elemento de custo, e sua redução possibilita maior flexibilidade e agilidade no fornecimento dos produtos, redução do ciclo financeiro, redução dos estoques e das áreas ocupadas para fabricação e armazenagem.

No enfoque do pensamento enxuto, a visão sobre a melhoria nas atividades que não agregam valor ou que são desnecessárias, e que muitas vezes representam 95 a 99% das atividades, é o contrário da visão tradicional que focaliza o processo de melhoria nas atividades que agregam valor [100]. A visão do pensamento enxuto em geral representa uma quebra nos paradigmas relacionados aos procedimentos tradicionalmente conduzidos para otimização do desenvolvimento de produto, inclusive na seleção dos materiais e processos de fabricação.

O procedimento de Mapeamento de fluxo de valor descrito, por exemplo, por Rother e Shook [19], propicia uma visão global dos processos e seus desperdícios (em um mapa do estado atual), e orienta o planejamento para a eliminação dos desperdícios onde os ganhos sejam significativos (em um mapa do estado futuro). É um procedimento de aplicação suficientemente simples e objetivo para permitir uma boa intermediação na comunicação e a busca de consenso entre especialistas e decisores, sem a minúcia de informações

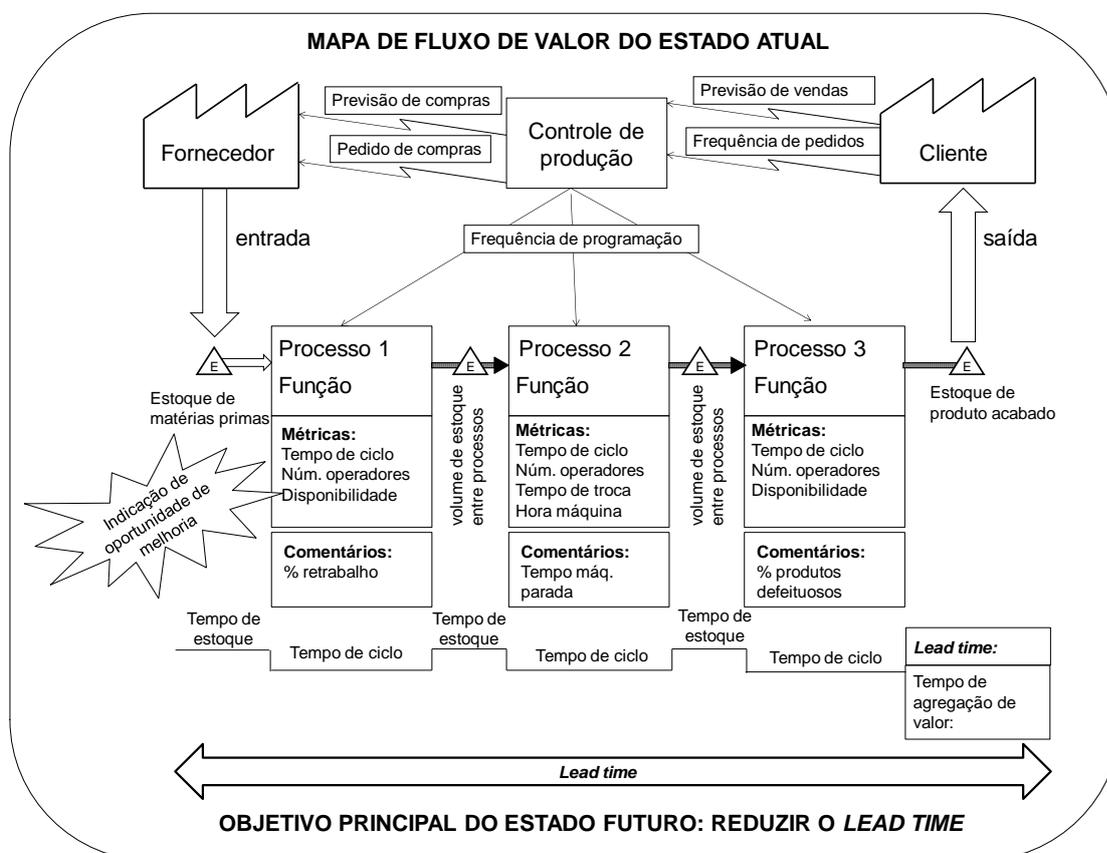
quantitativas, o que tende a evitar o prolongamento da tomada de decisões estratégicas por excesso de informações [99].

A orientação do método é para que tanto o estado atual como o futuro sejam desenhados à mão e em grupo, com representantes de diversas áreas responsáveis pelo produto, como manufatura, engenharia, logística etc. O estado atual é mapeado no sentido inverso ao da manufatura real, desde o setor de entrega do produto até o recebimento das matérias-primas (de porta a porta). Durante a atividade são registradas informações relativas ao fluxo de informações e sistemas de controle, e ao fluxo de materiais, conforme a visão do mapa mostrado na Figura 2.4:

- **Fluxo de informações e sistemas de controle entre cliente, produção e fornecedores**, registrado na parte superior do mapa, da direita para a esquerda, mostra a previsão de vendas e de aquisição de materiais-primas, a frequência e a forma de pedidos dos clientes, de aquisição das matérias-primas, e de programação e acionamento da produção.
- **Fluxo de materiais**, registrado da esquerda para a direita, incluindo, na parte intermediária do mapa, o registro dos estoques intermediários, e as características de cada processo ao longo da fabricação, como tempo de ciclo, número de operadores, disponibilidade dos recursos, percentual de retrabalhos, e percentual de produtos defeituosos. Na parte inferior do mapa, da esquerda para a direita, inclui-se uma linha com a notação dos tempos de ciclo de cada processo, e os tempos de processamento equivalentes ao volume dos estoques intermediários. A soma total dos tempos de ciclo dos processos, mais os tempos de estoque, resultarão no *lead time* de fabricação (tempo que uma peça leva para percorrer todo o processo, do início ao fim). Pela soma dos tempos de ciclo dos processos, desprezando-se os tempos relativos ao material parado aguardando processamento (tempos de estoque), obtém-se o tempo de agregação de valor.

A análise do mapa do estado atual pela aplicação dos conceitos de manufatura enxuta tem como objetivo principal a redução do *lead time* de fabricação, aproximando-o do tempo de agregação de valor. As oportunidades para melhoria são indicadas em caixas tipo explosão, conforme mostrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 Exemplo de representação do Mapa de Fluxo de Valor para registro do estado atual e indicação das oportunidades de melhoria.



Fonte: Elaboração pela autora a partir de [19].

O estado futuro é desenhado após análise do estado atual, juntamente com a elaboração de um plano de melhorias. O plano deve priorizar ganhos relevantes a partir da visão do todo, e sua efetivação pode implicar em alterações no projeto do produto, nos processos de fabricação e nos materiais utilizados.

Na indústria aeronáutica, a metodologia Mapeamento de fluxo de valor vem disseminando-se entre os principais fabricantes de aeronaves, tanto para

otimização da manufatura, como para os processos administrativos, e também no desenvolvimento dos produtos [100-103]. Nessa indústria, os conceitos de manufatura enxuta no desenvolvimento de produtos têm buscado, por exemplo: a) melhoria na utilização de recursos e redução do tempo entre a concepção e o lançamento [104-106]; b) otimização do planejamento, fabricação e montagem, com a aplicação dos conceitos de DFMA [94, 107]; c) aumento da qualidade de produtos [108]; d) implantação de processos automatizados [109]; e) otimização da cadeia de suprimentos [110], dentre outros.

Apesar dessa disseminação na indústria aeronáutica, verifica-se uma carência de publicações sobre a manufatura enxuta, e a seleção de materiais e processos, no contexto do desenvolvimento de produto.

## **2.4 Abordagens para melhoria ambiental dos produtos**

A análise ambiental durante o desenvolvimento do produto normalmente ocorre em dois momentos, na etapa 2 de desenvolvimento do produto, e na etapa 7 de acompanhamento e descontinuidade do produto (Quadro 2.2). Na etapa de desenvolvimento do produto, com a análise do impacto ambiental dos materiais e processos. Na etapa de acompanhamento e descontinuidade do produto, ajustando-o conforme possíveis novos requisitos ambientais, e executando os planos de disposição no final do ciclo de vida. As principais metodologias utilizadas são Análise do ciclo de vida, Projeto para o ambiente (*Design for environment*), os guias de *Ecodesign*, e ferramentas específicas para seleção de materiais como a *Ashby Eco-Audits* [80-83, 111-113].

Na etapa de fabricação do produto, além de metodologias como Análise do ciclo de vida [114], os conceitos de manufatura enxuta têm sido empregados para a redução dos impactos ambientais em diferentes setores industriais, como na produção de aeronaves, de automóveis, de laminados de madeira para acabamento de móveis, e de fabricação de pneus [46, 115-116].

Adaptações da metodologia Mapeamento de fluxo de valor têm sido observadas para subsidiar a gestão dos recursos ambientais. É o caso, por

exemplo, na indústria automobilística com a consideração de indicadores de sustentabilidade [117], e na indústria de fabricação de açúcar e álcool para avaliação do uso de água no fluxo de materiais [118].

O uso dos conceitos de manufatura enxuta com foco ambiental pode ser considerado uma evolução da manufatura enxuta para a manufatura sustentável, pois, além do objetivo de reduzir desperdícios para minimizar custos, está, por exemplo, a preocupação com a redução do consumo dos recursos naturais, com o reuso e a reciclagem dos materiais no final do ciclo de vida, e com o projeto do produto pensado de forma a simplificar os processos pós-uso dos materiais [43-44].

As possíveis estratégias de análise ambiental utilizadas pelas metodologias de desenvolvimento de produto, incluindo estratégias de otimização da manufatura, estão normalmente relacionadas à redução no consumo de recursos ou redução dos impactos ambientais, e geralmente afetam a escolha dos materiais, como mostrado no Quadro 2.4. Por exemplo, pode-se reduzir o consumo de recursos pela desmaterialização de componentes, pelo reuso ou reciclagem dos materiais, ou pela minimização das etapas de produção. Ou, ainda, podem-se reduzir os impactos ambientais pelo uso de materiais atóxicos, de fontes renováveis, ou que necessitem de pouca energia para serem produzidos.

Relativamente às metodologias de otimização da manufatura, como é o caso da manufatura enxuta, têm-se verificado na literatura científica que as medidas adotadas também podem melhorar o desempenho ambiental do produto, embora a aplicação destas medidas seja frequentemente limitada porque os materiais foram definidos na etapa de desenvolvimento do produto, e não há muita margem de substituição durante a manufatura [1, 76, 98].

Quadro 2.4 Estratégias para sustentabilidade dos produtos que afetam a escolha dos materiais.

Estratégias relacionadas à redução no consumo de recursos	Metodologia	Ref.
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desmaterializar produtos e componentes</li> <li>- Reduzir a quantidade de material no produto (tipos, espessura, integrar funções e combinar propriedades)</li> <li>- Reduzir materiais e energia necessária para uso, fabricação e manutenção do produto</li> <li>- Escolher materiais locais</li> <li>- Escolher materiais produzidos com baixo consumo de energia</li> <li>- Escolher materiais produzidos com baixa emissão de dióxido de carbono</li> <li>- Escolher materiais produzidos com baixo consumo de água</li> <li>- Reduzir energia para transporte e estocagem dos materiais</li> <li>- Otimizar logística com envolvimento da cadeia de suprimentos</li> <li>- Minimizar as etapas de produção</li> <li>- Escolher materiais que melhor atendam cada operação de processamento</li> <li>- Minimizar, reutilizar e reciclar sobras de processamento</li> <li>- Evitar embalagens durante a produção do produto</li> <li>- Reduzir o consumo de energia nos processos produtivos e escolher fontes de energia locais</li> <li>- Otimizar o uso de energia nas instalações de produção</li> <li>- Utilizar materiais de processamento reciclados</li> <li>- Reduzir uso e quantidades de materiais de processamento e de consumo</li> <li>- Utilizar materiais de processamento e de consumo provenientes de fontes renováveis</li> <li>- Reduzir energia para transporte e armazenagem do produto</li> <li>- Minimizar a quantidade de material para embalagem do produto</li> <li>- Otimizar o consumo de materiais e energia para uso e manutenção do produto</li> </ul>	<p><i>Ecodesign</i> ou Projeto para o ambiente (<i>Design for Environment</i>)</p> <p>Projeto para fabricação e montagem (<i>DFMA</i>)</p> <p>Manufatura enxuta (<i>Lean Manufacturing</i>)</p>	<p>[26]</p> <p>[28]</p> <p>[29]</p> <p>[82]</p> <p>[112]</p> <p>[21]</p> <p>[22]</p> <p>[103]</p> <p>[109]</p> <p>[98]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Remover desperdícios de processos relacionados a:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Defeitos: que produzem sucatas, ou consomem materiais e energia para retrabalho</li> <li>- Produção em excesso: que produz sucata e aumenta estoques</li> <li>- Excesso de processamento: que consome mais materiais e energia</li> <li>- Transporte: que consome mais energia</li> <li>- Estoques: que produzem sucatas e consomem área e energia para estoque</li> <li>- Espera: que produz estoques intermediários, e podem produzir sucata</li> </ul> </li> <li>- <u>Remover ou minimizar atividades de processamento requeridas pelo atual nível tecnológico</u>, mas que não agregam valor ao cliente e consomem mais materiais e energia</li> </ul>		

Estratégias relacionadas à redução no consumo de recursos	Metodologia	Ref.
<p><b>No produto:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar o uso de materiais tóxicos em todas as fases do ciclo de vida do produto</li> <li>- Evitar materiais que causem diminuição da camada de ozônio ou aquecimento global</li> <li>- Evitar materiais com origem problemática (como madeira de desmatamento)</li> <li>- Utilizar materiais reciclados, de fontes renováveis ou ambientalmente compatíveis</li> <li>- Utilizar matérias-primas produzidas a partir de fontes energéticas renováveis e ambientalmente compatíveis</li> <li>- Transportar matérias-primas até o local de uso utilizando fontes energéticas renováveis e ambientalmente compatíveis</li> </ul> <p><b>Aumentar a vida útil do produto:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Projetar para melhorar a confiabilidade, durabilidade e funcionalidade</li> <li>- Utilizar materiais bem experimentados e testados para obter um produto com alto nível de confiabilidade</li> <li>- Facilitar atualização, adaptação, manutenção, reparo, uso e remanufatura</li> </ul> <p><b>Aumentar a vida útil dos materiais:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Escolher materiais com tecnologias de reciclagem eficientes</li> <li>- Facilitar a reciclagem dos materiais</li> <li>- Facilitar a coleta e o transporte do produto no final do ciclo de vida</li> <li>- Minimizar materiais diferentes e evitar materiais compostos inseparáveis</li> <li>- Caso prendedores não possam ser eliminados, minimizá-los e padronizá-los</li> <li>- Evitar pigmentos, aditivos, materiais com composição desconhecida e substâncias que interfiram em processos de reciclagem</li> </ul> <p><b>Na fabricação do produto:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar materiais de processamento que causem diminuição da camada de ozônio ou aquecimento global</li> <li>- Evitar produção de lixo perigoso em todos as etapas de processamento</li> <li>- Utilizar fontes de energia renováveis e ambientalmente compatíveis</li> <li>- Eliminar a geração de emissões ambientais ao invés de coletá-las e tratá-las na manufatura</li> <li>- Entregar o produto utilizando fontes de energia renováveis e ambientalmente compatíveis</li> <li>- Evitar materiais tóxicos no uso, reparo e manutenção do produto</li> <li>- Evitar materiais que necessitem descarte específico para materiais perigosos</li> <li>- Assegurar fácil remoção de materiais perigosos no descarte do produto</li> <li>- Reutilizar, re-engenheirar ou reciclar o produto, preferencialmente a dispor em aterros ou incinerar para recuperação de energia</li> </ul>	<p><i>Ecodesign</i> ou Projeto para o ambiente (Design for Environment)</p> <p>Projeto para fabricação e montagem (DFMA)</p>	<p>[26] [28] [29] [82] [112]</p> <p>[21] [22] [103] [109]</p>

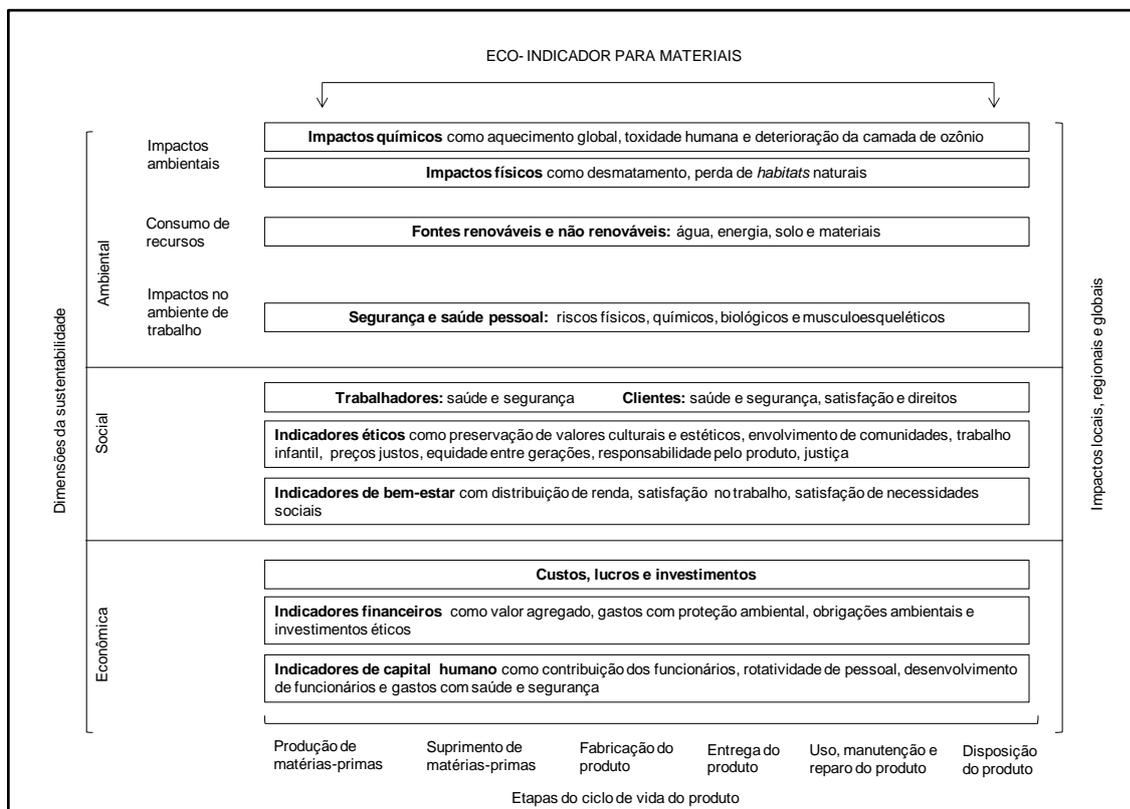
Fonte: [62].

A avaliação ambiental dos materiais e processos na etapa de desenvolvimento do produto, independentemente da metodologia e estratégias adotadas, requer indicadores.

A definição de eco-indicadores para os materiais deve considerar a influência dos materiais em todas as etapas do ciclo de vida do produto, nas diversas dimensões da sustentabilidade. Na Figura 2.5 são indicados parâmetros para a definição de eco-indicadores para os materiais, considerando as dimensões ambiental, social e econômica da sustentabilidade, e a interferência destes parâmetros nos âmbitos local, regional e global.

Os parâmetros na dimensão ambiental são os impactos físicos e químicos causados pelos materiais ao meio ambiente, a forma de consumo dos recursos naturais, e os impactos de saúde e segurança no ambiente de trabalho. Na dimensão social, a saúde e segurança dos trabalhadores e consumidores, e aspectos éticos e de bem estar social. Na dimensão econômica, aspectos de custos, lucros e investimentos envolvendo as questões ambientais e o capital humano da empresa.

Figura 2.5 Parâmetros para determinação de eco-indicadores para materiais.



Fonte: [58]. Elaboração pela autora a partir de [82, 111, 119-120].

A complexidade para a determinação de um único eco-indicador para cada material avaliado, combinando todos os possíveis impactos ambientais, normalmente resulta em estratégias para definição de indicadores que priorizam alguns impactos, em algumas fases do ciclo de vida do produto. Por exemplo, os impactos de consumo energético e emissões de dióxido de carbono na ferramenta *Ashby Eco-Audits* [82].

Na indústria aeronáutica, as categorias de indicadores ambientais para materiais que têm sido utilizados tratam principalmente: a) do uso eficiente dos recursos naturais (materiais e energia); b) do potencial de reuso ou reciclagem; c) do peso dos componentes para reduzir consumo de combustíveis e emissões atmosféricas; e, d) da redução ou eliminação de materiais com propriedades tóxicas, e danosas ao meio-ambiente ou a saúde e segurança dos seres humanos [26, 28-29].

Neste contexto, os impactos ambientais considerados na ferramenta *Ashby Eco-Audits* podem não ser suficientes para avaliar os atuais materiais utilizados em interiores de aeronaves. No caso destes materiais, parece ser muito importante incluir os impactos causados pelo uso substâncias tóxicas.

Os indicadores ambientais para a manufatura têm sido categorizados em cinco dimensões da sustentabilidade, conservação ambiental, econômica, social, avanço tecnológico, e desempenho gerencial e para atendimento aos objetivos de sustentabilidade ambiental, conforme mostrado no Quadro 2.5 [119-120].

Na dimensão da conservação ambiental destacam-se a redução dos impactos e do consumo dos recursos naturais, na dimensão econômica os gastos com capital humano e indicadores financeiros. Na dimensão social sobressaem-se as relações éticas e o bem-estar dos trabalhadores, dos consumidores e da sociedade. Na dimensão avanço tecnológico, pesquisas e desenvolvimento de tecnologias para melhoria do desempenho ambiental. Na dimensão desempenho gerencial a adoção de políticas e programas ambientais, e conformidade às regulamentações.

Quadro 2.5 Exemplos de categorias de indicadores de sustentabilidade na manufatura.

Dimensão da sustentabilidade	Categorias de indicadores	
	Conforme proposição Azapagic e Perdan (2000) [119]	Conforme proposição de Joung, Carrell, Sarkar e Feng (2013) [120]
Conservação ambiental	Impactos ambientais, eficiência ambiental e ações voluntárias (como sistema de gestão ambiental e avaliação de fornecedores).	Emissão, poluição, consumo de recursos e conservação do <i>habitat</i> natural.
Econômica	Indicadores financeiros e indicadores de capital humano.	Custos, lucros e investimentos.
Bem estar social	Indicadores éticos e indicadores de bem estar.	Trabalhadores, consumidores e comunidade.
Avanço tecnológico	-	Pesquisa, desenvolvimento e produtos de alta tecnologia.
Desempenho gerencial	-	Conformidade, políticas e programas.

Fonte: elaboração pela autora.

Na indústria aeronáutica, são identificadas ênfases nos esforços para redução do impacto ambiental da manufatura nas dimensões de conservação ambiental, econômica e avanço tecnológico [26, 28-29].

Na dimensão da conservação ambiental tem sido adotadas práticas, tanto na construção das aeronaves como nos processos produtivos, que otimizam o uso dos recursos naturais (como água, energia e materiais), que minimizam a produção de resíduos (sólidos, líquidos ou gasosos), e que reduzem o uso de materiais com propriedades intrinsecamente tóxicas e danosas à saúde e segurança das pessoas e ao meio ambiente. Adicionalmente, a otimização da logística e o envolvimento de fornecedores têm sido também utilizados como mecanismos para a melhoria da sustentabilidade ambiental.

Na dimensão econômica, a redução de custos e o aumento de valores são fundamentais para a competitividade dos fabricantes, o que se espera ser atingido com a adoção de práticas ambientalmente sustentáveis.

Com relação ao avanço tecnológico, tem-se adotado técnicas e critérios de desenvolvimento de produtos associados à metodologia de *Design for Environment*.

Também têm sido desenvolvidas pesquisas sobre a sustentabilidade em tecnologias de manufatura atualmente utilizadas na fabricação de interiores de aeronaves, abordando, por exemplo, os materiais compostos [121], a usinagem [44], a montagem [122], e os processos químicos de pintura, colagem e aplicação de verniz [123-124], envolvendo indicadores semelhantes aos atualmente empregados na indústria aeronáutica em geral, apesar de suas especificidades.

Em todos os setores, inclusive na indústria aeronáutica, observa-se importante dependência de aspectos tecnológicos de desenvolvimento do produto para que sejam incorporados materiais e processos de manufatura com baixo impacto ambiental, para que sejam concebidos produtos duráveis, com potencial de reciclagem, e projetados observando todas as etapas de seu ciclo de vida. Tais características de desenvolvimento do produto estão relacionadas de maneira direta às questões de bem estar social no que se refere à saúde e segurança, ao envolvimento das comunidades locais nas oportunidades de trabalho, ao fornecimento de insumos e consumo dos produtos, e ao atendimento às expectativas dos consumidores e da sociedade.

A importância da escolha das metodologias e indicadores é que estes podem direcionar para soluções com diferentes níveis de interferência no produto, e de eficiência ambiental como um todo. Manzini & Vezzoli [125] apresentam uma análise sobre os diferentes níveis de interferência que as questões ambientais podem ter sobre o desenvolvimento de produtos, conforme sintetizado no Quadro 2.6.

Especificamente no caso de aeronaves executivas deve-se considerar, por exemplo, que apesar da adoção de soluções que melhorem o desempenho ambiental dos componentes do interior, entre elas soluções que reduzam o

consumo de combustíveis das aeronaves, a aeronave executiva continuará sendo um produto de alto consumo de combustível per capita durante a fase de uso. Neste contexto, a minimização dos impactos deverá ocorrer mediante de ações de compensação financiadas pelos proprietários das aeronaves [126].

Quadro 2.6 Níveis de interferência das questões ambientais no desenvolvimento de produtos.

Níveis de interferência	Como se opera?	Escolhas	Estilo de vida e consumo	Referência ao componente social e ao mercado diante da questão ecológica	Eficiência ambiental
1- Redesign ambiental do existente	Considerando o ciclo de vida de um produto, trata de melhorar sua eficiência global em termos de consumo de matérias-primas e energia, além de facilitar a reciclagem de seus materiais e a reutilização de seus componentes	Prevalentemente técnicas	Não afeta	Sensibilização entre a escolha de produtos mais ecológicos, mediante oferta de produtos análogos entre si	+
2-Projeto de novos produtos ou serviços que substituam os atuais	Através da inovação técnico-produtiva, relacionada à busca de uma qualidade técnica-ambiental, através do redesign de produtos existentes	Técnicas, com alguma mudança conceitual (exemplo: carros elétricos)	Pouco afetado	Individualização daqueles que oferecem produtos e serviços ecologicamente mais favoráveis. Novas propostas devem ser reconhecidas como válidas e socialmente aceitas, diante de um quadro cultural e comportamental dominado por expectativas e valores diferentes	++
3- Projeto de novos produtos e serviços intrinsecamente sustentáveis	Através da inovação conceitual do produto ou serviço	Conceituais – Técnicas - Estratégicas	Afeta	Considera uma demanda de produtos e serviços mais sustentáveis potencialmente viáveis. Oferece uma nova maneira com resultados radicalmente favoráveis ao meio ambiente e socialmente apreciados, superando a inércia cultural e comportamental dos consumidores	+++
4- Propostas de novos cenários que correspondam ao estilo de vida sustentável	Através de dinâmicas complexas de inovações sócio-culturais	Socio-culturais: o papel técnico é importante, mas limitado à busca, proposição e estímulo de ideias socialmente produtivas	Muito afetado	Novo cenário sociocultural onde prevalecem “estilos de vida sustentáveis	++++

Fonte: Elaboração pela autora a partir de [126].



## 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1 Procedimento geral

O procedimento utilizado teve os seguintes principais propósitos:

- Identificação dos requisitos de seleção de materiais para o mobiliário de aeronaves executivas, componente do interior escolhido para análise, e como estes requisitos são aplicados no desenvolvimento do produto;
- Mapeamento dos atuais processos de fabricação do mobiliário de aeronaves executivas identificando desperdícios e impactos ambientais;
- Mapeamento do material mais relevante do mobiliário nas etapas do ciclo de vida do produto, para complementar a análise ambiental do mapeamento de processos;
- Identificação, a partir dos mapeamentos, de estratégias de projeto e requisitos de materiais e processos que possam ser utilizados nas etapas iniciais do desenvolvimento de produto visando melhorias econômicas e de sustentabilidade ambiental, e buscando contribuir para a maior integração projeto-materiais-processos;
- Proposição de procedimento para prospecção e seleção de materiais expandido para os demais componentes do interior de aeronaves executivas. Procedimento inserido no contexto do desenvolvimento do produto e considerando aspectos ambientais e de redução de perdas, conjuntamente com os demais aspectos do projeto aeronáutico; e,
- Busca de possíveis soluções em materiais que possam atender aos requisitos de materiais e processos identificados, com recomendações de pesquisa e desenvolvimento.

Para tanto, o procedimento englobou as etapas de levantamento de informações, de planejamento de estudos de caso e ferramentas analíticas, e de organização e análise dos resultados.

### **3.2 Levantamento de informações**

O levantamento de informações englobou levantamento de campo, entrevistas a especialistas e pesquisa documental.

Para o levantamento de informações visando à identificação de requisitos de materiais e processos, e para os mapeamentos de processo, foram realizadas visitas técnicas a quatro fabricantes de mobiliário que fornecem para os principais fabricantes mundiais de aeronaves executivas.

Nestas visitas, foram coletadas as informações sobre os materiais empregados e seus requisitos, procurando identificar fatores de influência na tomada de decisão na etapa de projeto do produto. Também foram coletadas informações específicas sobre os processos de fabricação, selecionadas para aplicação da metodologia Mapeamento de fluxo de valor e análise ambiental. A relação destas informações é apresentada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 Informações coletadas em visitas a fabricantes de mobiliário para aeronaves executivas.

- 1) Materiais empregados e seus requisitos.
- 2) Etapas de produção e sequenciamento.
- 3) Características dos processos aplicados a cada etapa:
  - Sequência de atividades;
  - Função das atividades;
  - Tempo médio de execução e mão de obra necessária;
  - Requisitos de processo;
  - Requisitos de infraestrutura;
  - Materiais de processamento requeridos;
  - Aspectos de segurança ocupacional envolvendo as atividades e as matérias primas utilizadas;
  - Perdas e resíduos de processamento;
  - Destino das perdas e resíduos de processamento.
- 4) Características de estoque de matérias-primas e produto.
- 5) Características de fornecimento de matérias-primas e envio dos móveis até o local de instalação nas aeronaves.

Foram também realizadas visitas a feiras de aeronaves executivas, móveis residenciais e embarcações, e a fábricas de móveis residenciais. Nestas visitas buscou-se identificar similaridades em termos de materiais e processos de fabricação, e seus requisitos, para identificar soluções que possam migrar entre estes setores afins. A relação dos eventos e fábricas visitadas durante o período da pesquisa é apresentada no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 Feiras e fábricas visitadas.

<b>Feira</b>	<b>Setor</b>
LABACE – Annual Latin American Business Aviation Conference & Exhibition	Aeronaves executivas
São Paulo BOAT SHOW – Feira Náutica	Embarcações
ForMóbile– Feira Internacional da Indústria Madeira e Móveis	Móveis residenciais
FIMMA – Feira Internacional de Máquinas, Matérias primas e acessórios para a indústria moveleira	Móveis residenciais
<b>Fábrica de móveis</b>	<b>Característica</b>
Residencial (MG)	Móveis residenciais personalizados de alto padrão
Residencial (SP)	Móveis de alto padrão, mas não personalizados
Espaços comerciais (SP)	Móveis para espaços comerciais a partir de projetos personalizados
Residencial (SP)	Móveis residenciais em produção seriada

Complementarmente às visitas, foram realizadas entrevistas com fornecedores de matérias-primas que atendem simultaneamente aos segmentos aeronáutico, residencial e náutico. Nas entrevistas buscou-se compreender os requisitos de desenvolvimento de materiais para cada um destes setores, a migração de soluções entre setores, e a identificação de soluções potenciais em materiais para a indústria aeronáutica. O questionário mostrado no Quadro 3.3 foi utilizado como auxílio às entrevistas realizadas aos fornecedores listados no Quadro 3.4.

Quadro 3.3 Informações coletadas em visitas a fabricantes de mobiliário para aeronaves executivas.

<p>1) De onde vem as tendências para os produtos desenvolvidos para interiores de aeronaves?</p> <p>Em termos de tipos e características dos produtos.</p> <p>Eles vêm de outros segmentos industriais?</p> <p>Eles vêm de algumas regiões específicas do mundo?</p> <p>Existem eventos que definem as tendências?</p>
<p>2) Quais têm sido os direcionadores tecnológicos para o desenvolvimento de novos produtos para a indústria aeronáutica?</p> <p>Exemplo: disponibilidade de matérias primas, necessidade de redução de custos, restrições para uso de materiais e substâncias químicas, demandas de clientes, entre outros.</p>
<p>3) Caso a questão ambiental seja um direcionador para o desenvolvimento de novos produtos para interiores de aeronaves, de onde vêm as demandas?</p> <p>Exemplo: clientes, fabricantes, restrições para uso de materiais e substâncias químicas, pressões sociais etc.</p>
<p>4) A empresa tem disponível (ou está desenvolvendo) algum produto com apelo ambiental para o segmento aeronáutico? Quais são as principais vantagens destes produtos?</p>
<p>5) Quais são os segmentos de atuação da empresa no mercado?</p> <p>Aeronáutica, naval, residencial, automóveis, outros...</p>
<p>6) Quais são os principais requisitos para os materiais nestes segmentos?</p>

Quadro 3.4 Fornecedores de matérias-primas entrevistados

<b>Matéria-prima</b>	<b>País de origem da empresa</b>	<b>Segmentos de atuação</b>
Verniz	Italia	Móveis residenciais, náuticos e aeronáuticos
Vernizes, tintas e laminados de madeira	Brasil	Móveis residenciais e aeronáuticos
Tintas	Suécia	Residencial e todos os segmentos de transporte
Laminados tipo fórmica	Brasil	Construção civil e moveleiro
Laminados de madeira ( <i>veneers</i> )	Estados Unidos	Aeroespacial, náutico e automotivo

A pesquisa documental para revisão bibliográfica e obtenção de resultados compreendeu os seguintes levantamentos:

- Publicações técnico-científicas nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, *Compendex - Engineering Village* e *SAE Technical Papers*. Os filtros de pesquisa utilizados nestas bases são mostrados no Quadro 3.5;
- Consulta a livros escritos por autores respeitados nas áreas de seleção de materiais e desenvolvimento de produto;
- Consulta a catálogos de materiais disponibilizados por fabricantes de matérias-primas;
- Consulta a páginas de *internet* de fabricantes de jatos executivos e associações aeronáuticas deste segmento;
- Consulta a *sites* disponíveis na internet de entidades de fomento e disseminação de conceitos em tecnologias de materiais, processos, e sistemas de manufatura.
- Consulta a bases de dados de Universidades, de resumos de textos de dissertações e teses; e,
- Documentos de patentes, nas bases *Derwent* e *Espacenet*. Na base *Derwent*, foi utilizado o filtro de pesquisa mostrado no Quadro 3.6 para coletar patentes de materiais com apelo ambiental para interiores de aeronaves. Os textos integrais das patentes foram acessados na base de dados *Espacenet*.

Quadro 3.5 Filtros da pesquisa para publicações técnico-científicas.

<b>Bases de dados:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Web of science: Coleção Principal e SciElo</li> <li>• Compendex - Engineering Village</li> <li>• Scopus: Physical Sciences</li> </ul>	Período: 1995 a 2015 Última atualização: dez. 2015
<b>Tópico</b>	<b>Expressão de busca</b>
Materiais para interiores de aeronaves	<b>Tópico:</b> (aircraft AND material* AND (interior OR cabin))
Requisitos de materiais para interiores de aeronaves	<b>Tópico:</b> (((aircraft AND (interior OR cabin)) AND material*) AND requirem*)
Seleção de materiais e/ou processos no desenvolvimento de produtos	<b>Título:</b> (material* AND/OR Process*) AND select* AND product AND (developm* OR design*)
Otimização da manufatura ou processos no desenvolvimento de produtos	<b>Título:</b> ((optimiz* OR optimal) AND (manufact* OR process)) AND ((product* NEAR/0 (developm* OR design)))
Seleção de materiais para otimização da manufatura ou processos	<b>Tópico:</b> ((optimiz* OR optimal or lean) AND (manufact* OR process)) AND ((material* AND selection*))
Análise de valor aplicada à seleção de materiais ou processos	<b>Título:</b> (((material* OR process) AND selection)) AND <b>Tópico:</b> (value near/2 (analys* OR Engineering OR map* OR strem OR chain))
Seleção de materiais ou processos sustentáveis	<b>Título:</b> ((material* OR process) AND selection*) AND (sustainab* OR eco-friend* OR (environment* SAME (friend* OR good)))
Indicadores de sustentabilidade para materiais	<b>Título:</b> (indicator* or index*) AND (material*) AND (sustainab* OR eco-friend* OR (environment* SAME (friend* OR good)))
Indicadores de sustentabilidade para processos	<b>Título:</b> (indicator* or index*) AND (process OR manufact*) AND (sustainab* OR eco-friend* OR (environment* SAME (friend* OR good)))
Materiais ou processos sustentáveis para interiores de aeronaves	<b>Tópico:</b> ((aircraft*) AND (interior* OR cabin*)) AND (material* OR process) AND (sustainab* OR eco-friend* OR (environment* SAME (friend* OR good)))
<b>Base de dados:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• SAE Technical Papers</li> <li>• Coleção: <i>Aerospace</i></li> </ul>	Período: 1995 a 2015 Última atualização: dez. 2015
<b>Tópico</b>	<b>Filtro</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiais ou processos para interiores de aeronaves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interior, cabins and cockpits/ material OR process</li> <li>• Material/ interior</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mobiliário para interior de aeronaves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parts and components/ furniture OR cabinet</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleção de materiais ou processos no projeto de aeronaves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Design engineering and styling/ Design process/ material AND selection</li> <li>• Design engineering and styling/ Design process/ process AND selection</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação de interiores de aeronaves</li> <li>• Otimização na fabricação de aeronaves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manufacturing/ interior OR cabin</li> <li>• Manufacturing/ lean OR optimization</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustentabilidade ambiental dos materiais e processos</li> <li>• Regulamentações ambientais para interiores de aeronaves</li> <li>• Desenvolvimento sustentável de aeronaves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Environment/ Life cycle analysis/ material OR process</li> <li>• Environment/ Environmental regulations and standards/ interior OR cabin</li> <li>• Environment/ Sustainable development</li> </ul>

Quadro 3.6 Filtros da pesquisa para coleta de patentes de materiais com apelo ambiental para interiores de aeronaves na base de dados *Derwent*.

**Filtros da pesquisa:** Tópico: (aircraft and material\*) AND Tópico: (furnish\* or furniture or cabin or (interior SAME (cabin or aircraft))) AND Tópico: (sustainab\* or eco-friend\* or (environment\* SAME (friend\* OR good)))

Período de abrangência: Todos os anos das bases de dados

Última atualização do levantamento: out. 2015

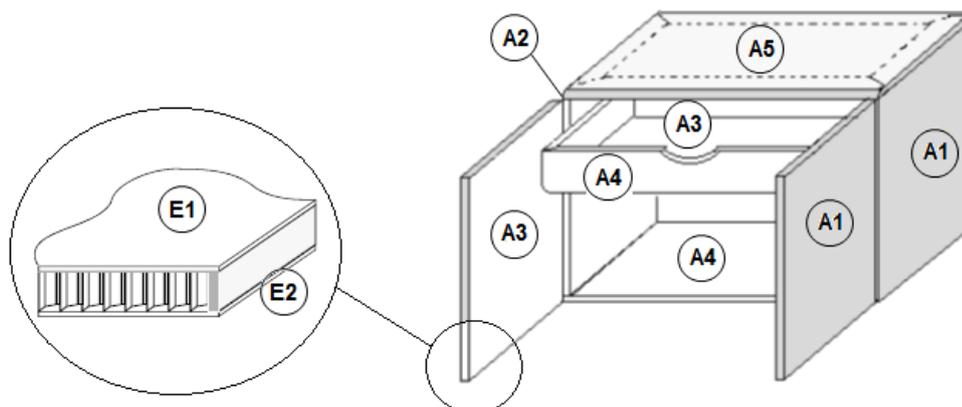
### 3.3 Planejamento de estudos de caso e ferramentas analíticas

Para melhor compreensão e análise das perdas na fabricação do mobiliário, e do atual desempenho ambiental desta fabricação, foi definido um produto hipotético que representasse uma amostra do conjunto do mobiliário utilizado em aeronaves executivas em termos de materiais empregados, técnicas de construção e processos de fabricação.

O produto definido foi um gabinete, cujos materiais, processos de fabricação e técnicas de construção são apresentados na Figura 3.1. Os elementos envolvidos na junção e fixação dos elementos estruturais são apresentados na Figura 3.2. Esses elementos podem ser considerados representativos para a maioria dos itens de mobiliário do interior de uma aeronave executiva, e seguem orientações dos fabricantes das placas de material composto que constituem a principal estrutura dos móveis [15].

As dimensões escolhidas para o gabinete modelo foram 60 x 40 x 45 cm (respectivamente largura x profundidade x altura), obtendo-se ordens de grandeza para os tempos e ciclos de processamento mais representativas da tecnologia de fabricação, do que do tamanho e da complexidade do móvel. Os valores de tempos e ciclos das atividades foram obtidos a partir do levantamento de campo ou das especificações técnicas de uso dos materiais publicamente disponibilizadas em catálogos pelos fabricantes das matérias-primas.

Figura 3.1 Materiais selecionados, e detalhes da estrutura de sustentação e dos acabamentos do gabinete modelo.

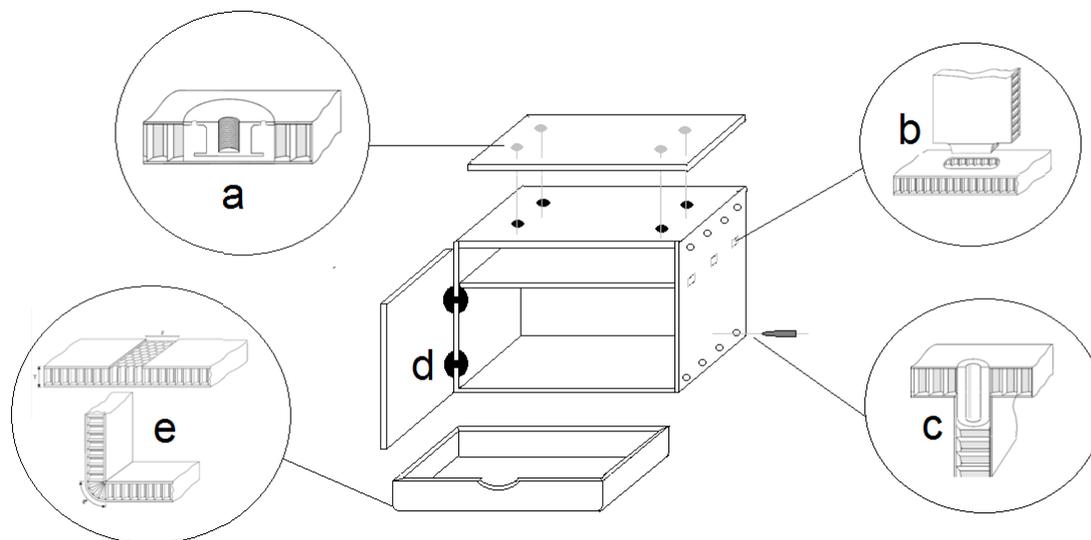


\* Ilustração do painel sanduíche adaptada de [15].

Legenda	Materiais da estrutura de sustentação do móvel
<b>E1</b>	Painel sanduíche com núcleo de poliaramida em forma de colmeia, e faces de resina fenólica ou epóxi reforçadas com fibra de vidro [15].
<b>E2</b>	Resina epóxi, como possível presença de elementos inertes como microesferas de vidro para reduzir a densidade [15, 52, 127]. A função é o fechamento dos contornos das peças em painel sanduíche para processos de acabamento (pintura ou colagem de laminados), ou reforçar áreas de painel para instalação de elementos de fixação.
<b>Materiais de acabamento</b>	
<b>A1</b>	Folheado de madeira [12] com posterior aplicação de verniz poliuretânico, acrílico ou políester, de base solvente e cura por polimerização a baixas temperaturas [56]. Folheado colado no painel sanduíche com adesivo de contato a base de neoprene [61].
<b>A2</b>	Madeira maciça com posterior aplicação de verniz de base solvente e cura por polimerização a baixas temperaturas [56]. Madeira colada com adesivo epóxi no contorno do painel sanduíche, preenchido com resina epóxi [50].
<b>A3</b>	Laminado tipo fórmica - papel decorado, tratado com resina melanímica, sobre base de folhas de papel <i>kraft</i> impregnadas com resina fenólica [64]. Laminado colado no painel sanduíche com adesivo de contato a base de neoprene [61].
<b>A4</b>	Tinta de base solvente ou água, sistema poliuretânico, e cura por polimerização a baixas temperaturas [58].
<b>A5</b>	Espumas de polietileno e poliuretano revestidas com tecido sintético bloqueador de chama [16] e couro natural ou sintético [54].

Fonte: Elaboração pela autora.

Figura 3.2 Técnicas de construção, e materiais para junção e fixação dos elementos estruturais selecionados para o móvel do estudo de caso.



\* Ilustrações das técnicas de junção adaptadas de [15]

Legenda	Técnicas e materiais utilizados para construção da estrutura do móvel
<b>a</b>	União do tampo do estofado na caixa estrutural do móvel por insertos e parafusos em aço [53]. Insertos fixados na estrutura de painel sanduíche com adesivo epóxi [50-52].
<b>b</b>	União da divisória na parte interna da caixa estrutural do móvel pela técnica de ranhura e lingueta [15], e junção colada com adesivo epóxi [52].
<b>c</b>	União das cinco placas de painel sanduíche que formam a caixa estrutural do móvel pela técnica de inserção de pinos de alumínio e preenchimento com adesivo epóxi [15, 52-53].
<b>d</b>	Dobradiça em metal, fixada na estrutura de painel sanduíche por insertos e parafusos em aço [58]. Insertos fixados na estrutura de painel sanduíche com adesivo epóxi [50, 52, 127].
<b>e</b>	Fabricação da gaveta pela técnica de corte e dobra de painel sanduíche [15], e junção colada com adesivo epóxi [52].

Fonte: Elaboração pela autora.

As perdas no processo de fabricação deste gabinete modelo foram avaliadas com o auxílio da metodologia de Mapeamento de fluxo de valor, conforme procedimentos e notação de Rother e Shook (2003) [19]. O

mapeamento englobou desde o fornecimento de matérias primas até o envio do produto para montagem no interior da aeronave, na rota de processo identificada com maior frequência entre os fabricantes de mobiliário. No mapeamento procurou-se identificar:

- a) Atividades de processamento necessárias devido às atuais tecnologias de materiais e processo, mas que não agregam valor ao produto;
- b) Desperdícios de matérias-primas e de tempo no ciclo de produção devido às tecnologias de processamento;
- c) Perdas devido às estratégias de uso dos materiais no produto, de suprimento de matérias-primas, e de envio dos móveis até o local em que serão instalados nas aeronaves.

Com o propósito de obter uma visão integrada entre as questões de manufatura e ambientais, a análise ambiental do processo de fabricação para o gabinete modelo, na mesma rota de processo escolhida para a análise de perdas, foi realizada utilizando uma adaptação da metodologia Mapeamento de fluxo de valor.

Para esta adaptação foram realizadas as seguintes etapas e atividades:

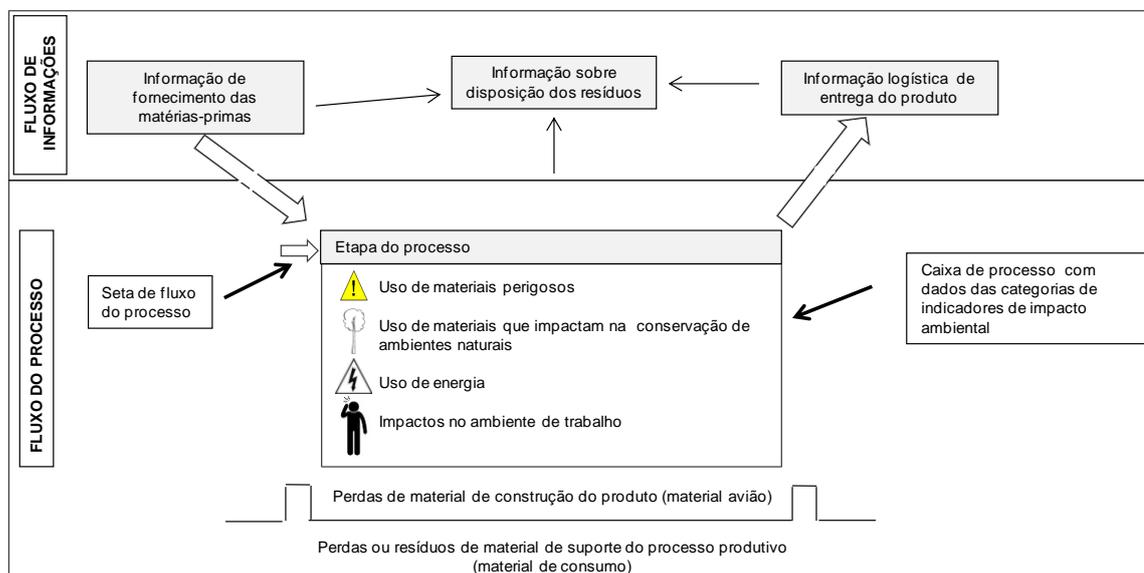
- Proposição de categorias de indicadores de sustentabilidade na manufatura, e forma de análise de impactos ambientais nestas categorias, que permitissem orientar a análise semi-qualitativa da situação atual do mobiliário aeronáutico, bem como as eventuais mudanças para a redução dos impactos. As categorias de indicadores selecionadas e forma de análise dos impactos são apresentadas no Quadro 3.7.
- Adaptação da representação das informações coletadas em um Mapa de fluxo de valor conforme modelo proposto por Rother e Shook (2003) [19], para abranger registros das categorias de indicadores de sustentabilidade ambiental conforme mostrado na Figura 3.3.

Quadro 3.7 Proposta de categorias de indicadores de sustentabilidade e forma de análise dos impactos ambientais para Mapeamento do fluxo de valor na manufatura de componentes para interiores de aeronaves executivas.

Dimensão da sustentabilidade	Categoria de indicador	Grupo	Forma de análise dos impactos
Ambiental	Impacto ambiental	Químico	<p>Uso de materiais tóxicos com geração de resíduos perigosos, ou possibilidade de poluição da água, ar ou solo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• baseado em legislações e regulamentações internacionais para proteção ambiental, e para saúde e segurança dos trabalhadores</li> <li>• considerando todas as etapas do ciclo de vida do produto</li> </ul>
		Físico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de materiais que causam degradação dos ambientes naturais</li> <li>• Quantidade de materiais reutilizados ou reciclados no processamento, e na disposição do produto no final do ciclo de vida</li> </ul>
	Consumo de recursos	Energia	<p>Tipo e quantidade de energia consumida para:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Processamento das matérias-primas</li> <li>• Contenção e disposição de resíduos</li> <li>• Transporte de matérias-primas e do produto final até o ponto de uso</li> </ul>
		Solo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impacto dos materiais e processos na necessidade de infraestrutura para fabricação do produto</li> <li>• Uso do solo para disposição de resíduos</li> </ul>
		Materiais	<p>Eficiência no uso dos materiais:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % de matérias-primas convertidas em produto</li> <li>• Perdas de material de suporte do processo produtivo (material de consumo) ou resíduos de fabricação</li> <li>• Volume, tipo e destino de embalagens de matérias-primas e do produto acabado</li> </ul>
	Sócio-ambiental	Impacto no ambiente de trabalho	Físicos
Químicos			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de doenças nos trabalhadores pela exposição à produtos químicos</li> </ul>
Social	Consumidor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riscos à saúde e segurança dos consumidores</li> </ul>	
	Sociedade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oportunidades de envolvimento das comunidades locais</li> </ul>	
Econômica	Gastos com capital humano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gastos com saúde e segurança dos trabalhadores</li> </ul>	
	Custos financeiros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gastos com proteção ambiental</li> </ul>	

Fonte: Elaboração pela autora a partir de [44, 122-123, 119-121, 124, 128].

Figura 3.3 Proposta de representação das informações no mapeamento do fluxo de valor para resultados ambientais.



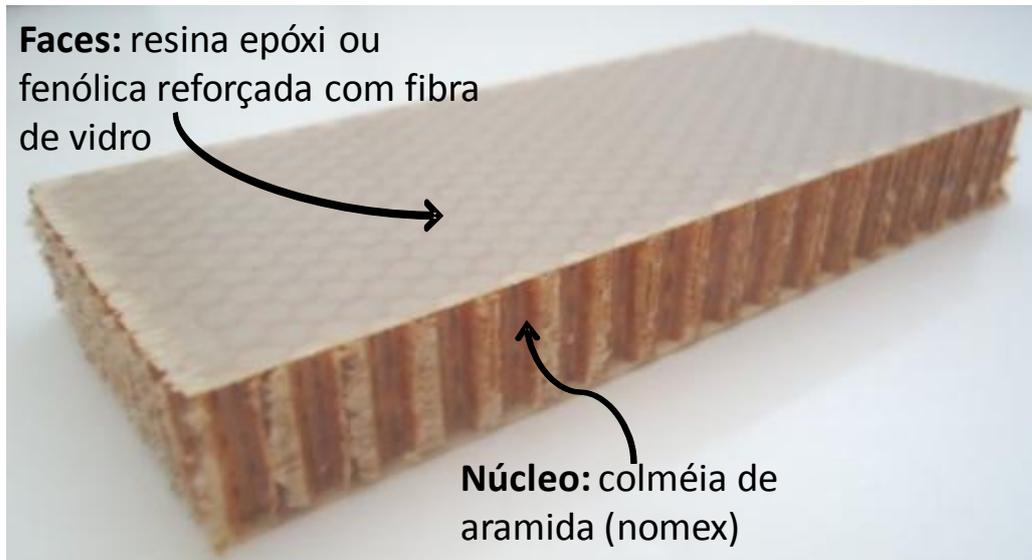
Fonte: Elaboração pela autora.

Para melhor compreensão e identificação das estratégias de projeto de produto, e de requisitos de materiais e processos para produção de interiores de aeronaves sustentáveis, uma matéria-prima do gabinete modelo hipotético foi escolhida para análise de seus impactos durante o ciclo de vida do produto.

Para análise dos impactos foram utilizados os conceitos embutidos nas metodologias *Ecodesign*, Projeto para o ambiente (*Design for environment*), Projeto para fabricação e montagem (DFMA) e manufatura enxuta.

O material escolhido foi o painel sanduíche utilizado como elemento estrutural, por representar mais de 90% do volume total do gabinete modelo. Este material de uso consolidado na indústria aeronáutica, composto por um núcleo tipo colmeia de aramida e faces de resina fenólica ou epóxi reforçadas com fibra de vidro, é apresentado na Figura 3.4. A densidade típica deste painel está entre 29 e 144 kg/m<sup>3</sup>, dependendo da espessura do núcleo [49].

Figura 3.4 Painel sanduíche utilizado como estudo de caso.



Fonte: Elaboração pela autora a partir de [15].

### 3.4 Organização e análise dos resultados

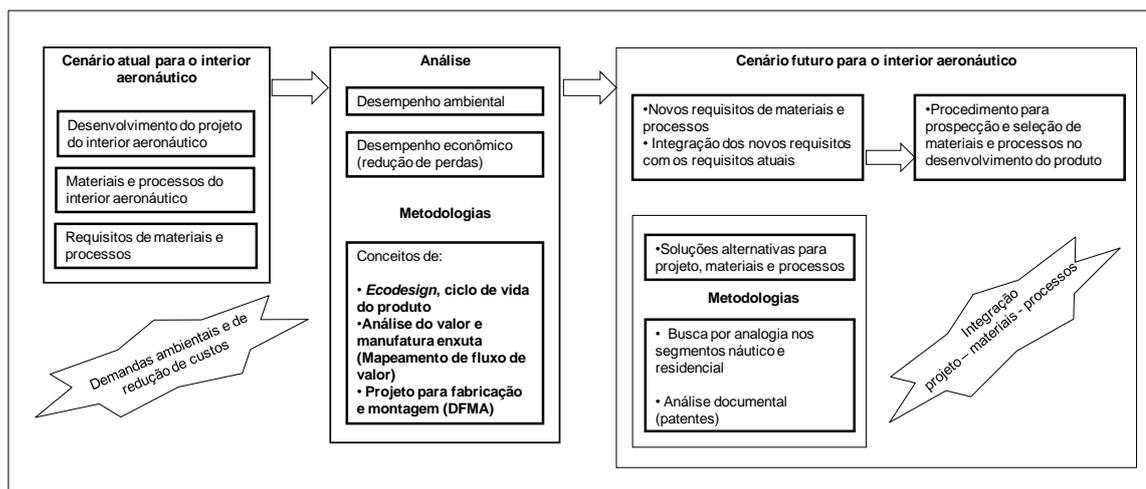
Os resultados obtidos a partir dos mapeamentos para os estudos de caso foram utilizados para desenho de um estado futuro com potencialidades de melhorias.

As potencialidades de melhorias econômicas e ambientais foram comparadas e contrastadas, avaliando e recomendando possíveis soluções em materiais e processos.

Os estudos de caso, complementados pelo levantamento de informações sobre requisitos de materiais e processos, foram utilizados para estruturar um procedimento para prospecção e seleção de materiais e processos, aplicável a componentes de interiores de aeronaves executivas. Na elaboração deste procedimento buscou-se integrar os requisitos identificados para melhorias econômicas e ambientais, aos requisitos do projeto aeronáutico, e aproximar a relação projeto-materiais-processos nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto.

O esquema de organização e análise dos resultados, incluindo a proposição do procedimento para prospecção e seleção de materiais, e a elaboração de conclusões e recomendações, é apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 Esquema da organização e análise dos resultados.



Fonte: elaboração pela autora



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Materiais e processos de fabricação do mobiliário de interiores de aeronaves**

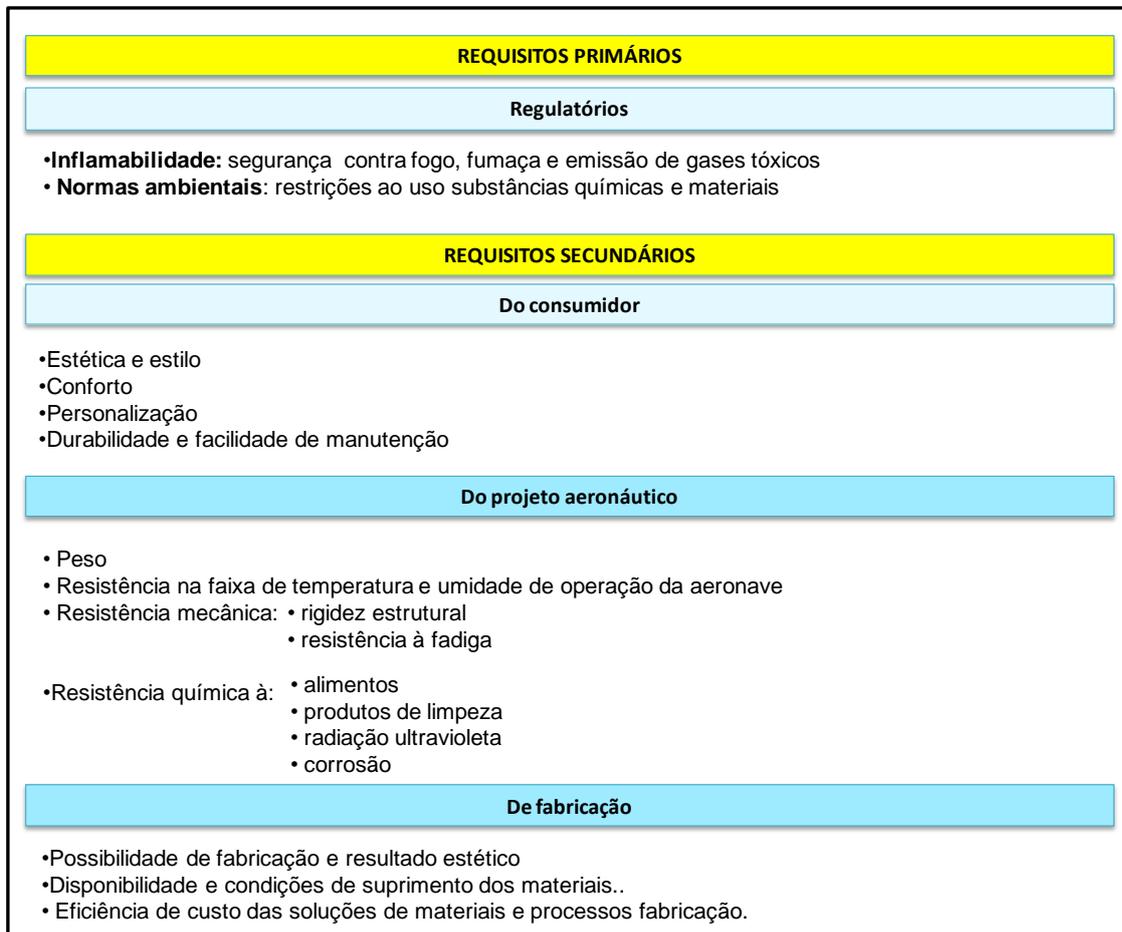
#### **4.1.1 Requisitos para materiais e aplicação no desenvolvimento do produto**

Verificou-se que os principais requisitos para seleção de materiais para móveis de aeronaves executivas definidos por autoridades regulatórias são considerados primários, por serem obrigatórios, e englobam inflamabilidade e normas ambientais; enquanto que os definidos pelos fabricantes da indústria aeronáutica são considerados secundários, e estão associados ao consumidor, ao projeto aeronáutico e à fabricação, conforme apresentado na Figura 4.1.

Os requisitos secundários são utilizados para conciliar o atendimento às expectativas dos clientes à atratividade comercial e lucratividade do produto. Englobam principalmente:

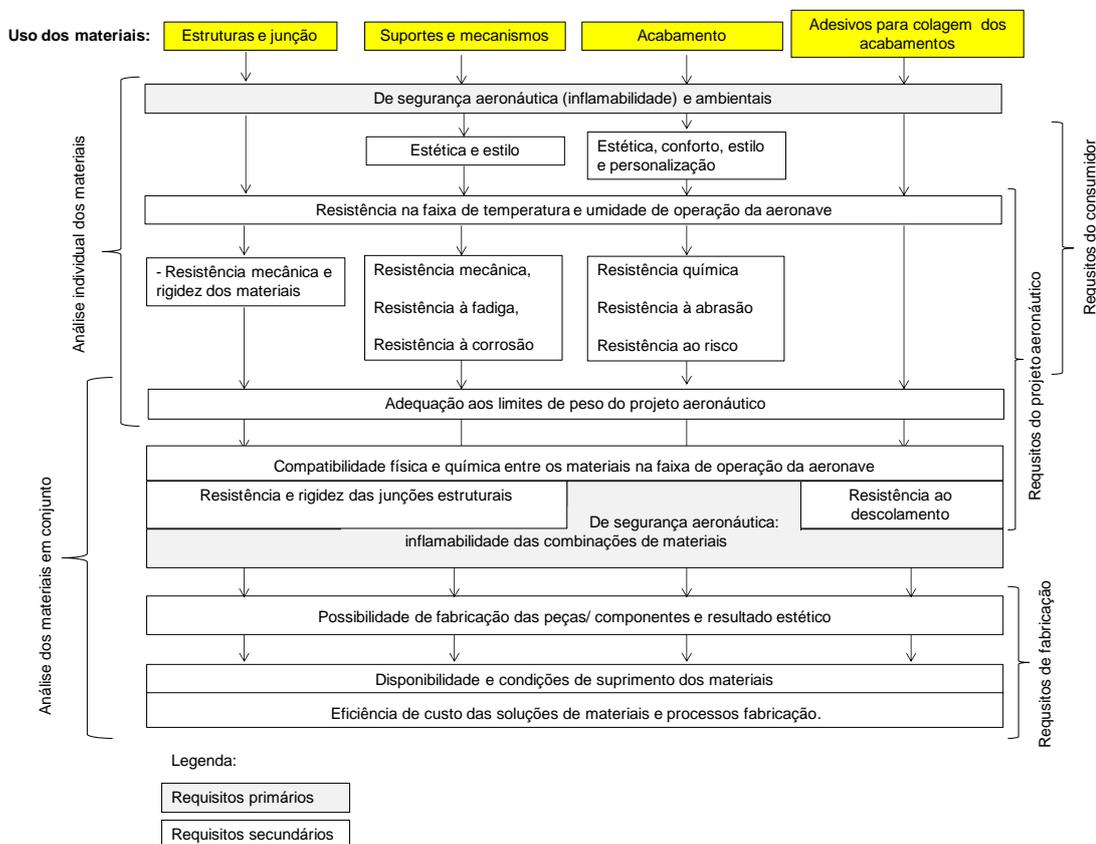
- aspectos de estética, conforto, estilo e personalização;
- durabilidade e facilidade de manutenção do produto;
- adequação aos limites de peso da aeronave;
- resistência na faixa de operação;
- adequação das propriedades conforme a função dos materiais no produto;
- possibilidade de fabricação das peças e componentes;
- resultado estético do processo de fabricação;
- disponibilidade e condições de suprimento dos materiais, e;
- eficiência do custo das soluções de materiais e de processos de fabricação dentro dos limites do projeto aeronáutico.

Figura 4.1 Requisitos para seleção dos materiais no desenvolvimento de móveis para aeronaves executivas.



Os requisitos primários e secundários tendem a ser utilizados de maneira sequencial, e restringem as possibilidades dos materiais durante o desenvolvimento do produto de maneira aproximada à apresentada no fluxograma da Figura 4.2. Os requisitos são em geral aplicados primeiramente aos materiais individualmente, nas etapas iniciais de prospecção e seleção de candidatos, e, depois, em conjunto, na etapa de detalhamento do produto. Eles podem ser repetidos em cada um destes dois momentos, a exemplo do requisito de inflamabilidade, ou serem particulares a um dos momentos, como os requisitos de fabricação.

Figura 4.2 Sequência de aplicação dos requisitos para seleção de materiais no desenvolvimento de móveis para interiores de aeronaves executivas.



Os requisitos primários são o primeiro filtro do processo de seleção e aplicáveis a todos os grupos de materiais, com exceção do requisito de inflamabilidade para os materiais metálicos.

Os requisitos secundários do consumidor e do projeto aeronáutico se diferenciam em função do uso do material no produto, como mostrado na Figura 4.2. Os principais grupos de materiais e seus requisitos específicos são:

- Materiais estruturais e de junção de componentes estruturais: resistência e rigidez.
- Suportes de fixação e mecanismos de movimentação: estética, estilo, resistência mecânica, resistência à fadiga e resistência à corrosão.
- Materiais de acabamento: estética, conforto, estilo, personalização, durabilidade, resistência química à produtos de

limpeza, resistência química à alimentos e à radiação ultravioleta, resistência à abrasão, e resistência ao risco.

- Adesivos para colagem de acabamentos: resistência ao descolamento.

Os requisitos secundários de estética, conforto, estilo e personalização são tão importantes para o grupo de materiais de acabamento que, muitas vezes, são aplicados antes dos requisitos primários nas etapas iniciais de seleção dos materiais. Esta inversão pode resultar na necessidade de desenvolvimentos em materiais para adequação aos requisitos de inflamabilidade e ambientais. Por outro lado, pressões de prazo e custo no desenvolvimento do produto, e possíveis barreiras tecnológicas e de conhecimento para adequação dos materiais promissores aos requisitos primários, frequentemente restringem a prospecção inicial dos materiais a poucas opções de uso consolidado, supridas por fornecedores especializados e concentrados na América do Norte e Europa.

Os requisitos para definição do processo de fabricação a partir dos materiais selecionados também estão muito relacionados ao resultado estético, até prioritariamente aos aspectos de produtividade e custo.

Outro fator que pode restringir as opções na prospecção dos materiais de acabamento é a tecnologia atual para fabricação das estruturas dos móveis baseada no uso de painéis de material composto, com estruturas tipo sanduíche e núcleo em forma de colmeia. Esta tecnologia foi identificada como chave para a seleção dos demais materiais e processos de fabricação. Ela define as técnicas de junção que podem ser empregadas nos painéis e requer etapas adicionais de processo para aplicação dos acabamentos. Os materiais de acabamento, resinas, e adesivos que possam vir a ser utilizados para fixar os acabamentos nas estruturas, precisam ser química e fisicamente compatíveis com o material dos painéis nas condições extremas de variação de temperatura e umidade durante a operação da aeronave. A compatibilidade é necessária para possibilitar boa adesão e evitar deterioração do produto, como

empenamentos e trincas, ou alterações estéticas como manchas e mudanças de cor no acabamento.

#### **4.1.2 Tecnologias de materiais e processos empregados**

Os painéis de material composto utilizados para fabricação das estruturas dos móveis aeronáuticos, e que também servem de substrato para os materiais de acabamento visíveis no produto, determinam as técnicas de união das partes para construção dos móveis, e definem requisitos para os materiais de junção e de acabamento.

Verificou-se que os materiais e as técnicas de junção das peças para montagem das estruturas, e o tipo e precisão dos recursos para corte de peças, são decisivos para a definição do fluxo do processo de fabricação dos móveis, definindo duas rotas diferentes de processamento.

Em uma das rotas de fabricação, o contorno das peças é de baixa precisão e a aplicação dos acabamentos é realizada após a montagem das estruturas. Esta rota é indicada como “Rota 1” na Figura 4.3 e detalhada na Figura 4.4. A aplicação dos acabamentos após a montagem das estruturas é necessária quando o corte do contorno das peças é de baixa precisão e a montagem requer ajustes dimensionais; e/ou quando a técnica de junção deixa aparente o sistema de fixação, como é o caso da inserção de pinos ilustrada pela letra “c” da Figura 3.2.

Na outra rota, indicada como “Rota 2” na Figura 4.3 e detalhada na Figura 4.5, a aplicação dos acabamentos é realizada antes da montagem das estruturas. Esta rota é possível devido ao corte de precisão em cada peça individualmente, já com acabamento, no plano cartesiano XYZ e com rotações sobre os eixos X e Y (etapa 3 na Figura 4.5). O corte das peças pelo processo de usinagem conhecido como 5 eixos também requer o uso de ferramentas que proporcionem acabamento de corte com alta qualidade. Estas características de usinagem, em conjunto com uma técnica de união de peças

não aparente como é o da ranhura e lingueta ilustrada pela letra “b” da Figura 3.2, é o que possibilita a montagem das estruturas após a aplicação do acabamento.

Figura 4.3 Rotas de fabricação de mobiliário aeronáutico a partir da utilização de material composto na estrutura.

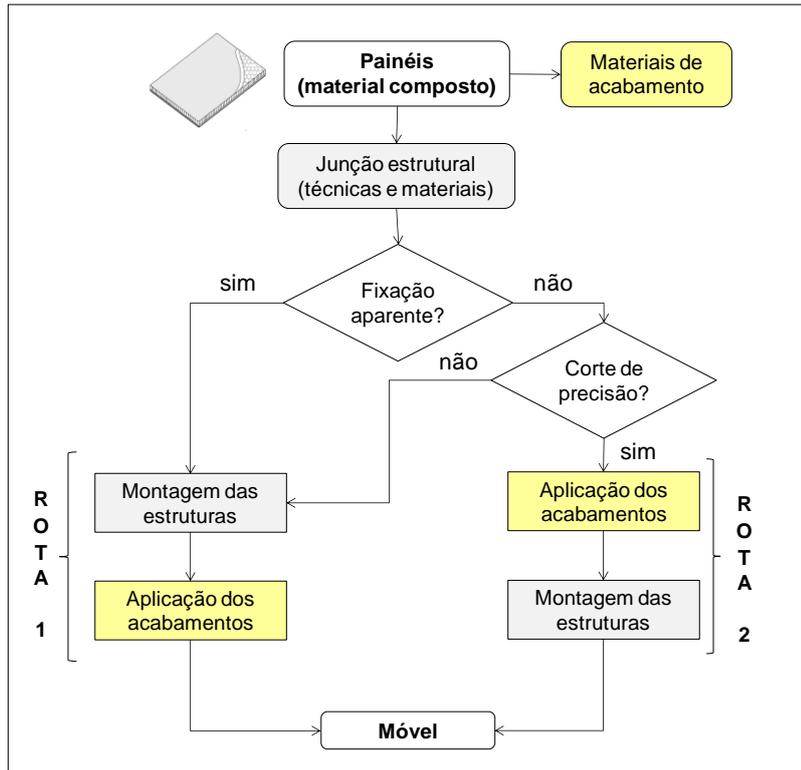


Figura 4.4 Rota 1 para fabricação de móveis aeronáuticos.

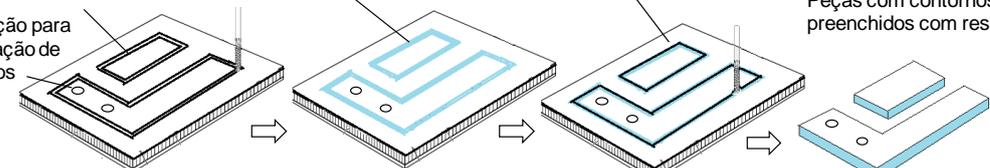
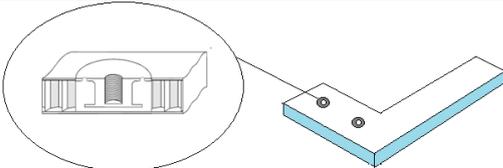
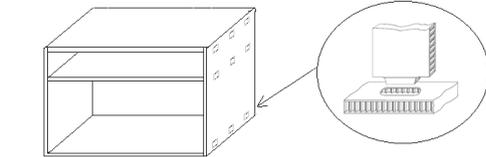
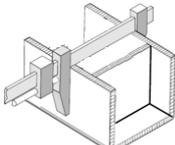
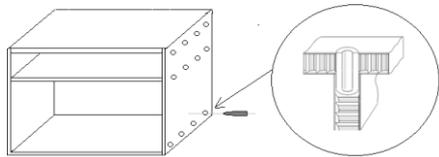
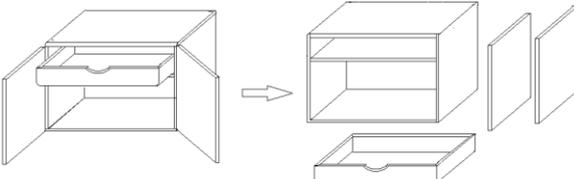
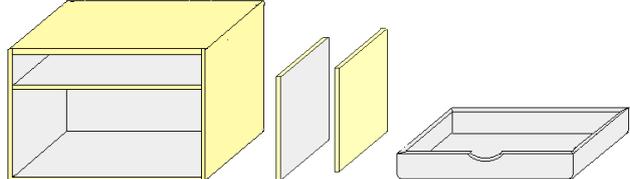
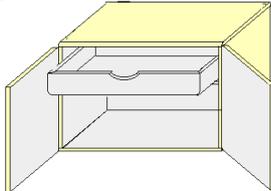
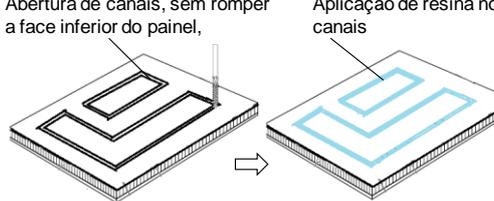
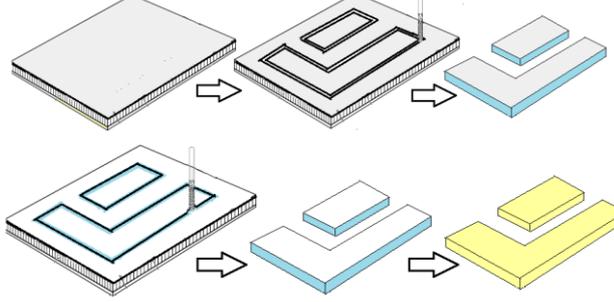
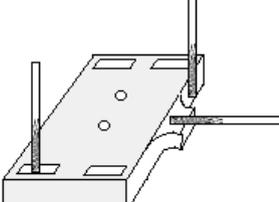
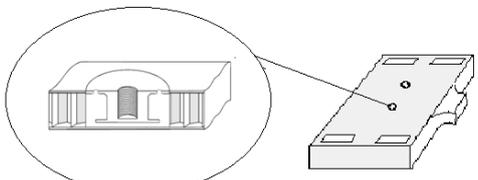
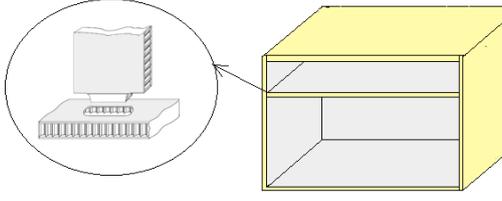
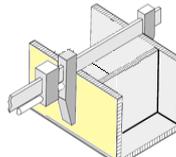
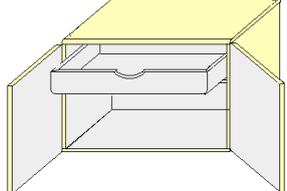
<p><b>Etapa 1:</b> Fabricação de peças em painel</p>	<p>Abertura de canais, sem romper a face inferior do painel, e furação para instalação de insertos</p> <p>Aplicação de resina nos canais</p> <p>Recorte das peças</p> <p>Peças com contornos preenchidos com resina</p> 	
<p><b>Etapa 2:</b> Instalação de insertos</p>	 <p>- Colagem de insertos roscados* metálicos com adesivo</p> <p>* Insertos para fixação de partes móveis</p>	
<p><b>Etapa 3:</b> Montagem das estruturas</p>	<p><b>Opção 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- União das peças estruturais com adesivo</li> </ul>  <p>- Travamento para cura</p> 	<p><b>Opção 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- União temporária com adesivo de cura rápida</li> <li>- Execução de furos para pinos</li> <li>- Inserção de pinos</li> <li>- Inserção de adesivo</li> </ul> 
<p><b>Etapa 4:</b> Pré-montagem do móvel</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Montagem das partes móveis para ajustes de folgas e degraus</li> <li>- Desmontagem para aplicação do acabamento</li> </ul>	
<p><b>Etapa 4:</b> Aplicação dos acabamentos</p>		
<p><b>Etapa 5:</b> Montagem final do móvel</p>	 <p>- Fixação das partes móveis por insertos e parafusos</p>	

Figura 4.5 Rota 2 para fabricação de móveis aeronáuticos.

<p><b>Etapa 1:</b> Pré-corte do painel e aplicação de resina</p>	<p>Abertura de canais, sem romper a face inferior do painel,</p> <p>Aplicação de resina nos canais</p> 	
<p><b>Etapa 2:</b> Aplicação de acabamentos e corte sob medida das peças</p>		<p><u>Opção 1:</u> aplica acabamento =&gt; recorta as peças do painel, ou</p> <p><u>Opção 2:</u> recorta as peças do painel =&gt; aplica acabamento</p>
<p><b>Etapa 3:</b> Recorte das peças na dimensão final</p>		<p>- Corte de precisão do contorno e detalhes das peças</p>
<p><b>Etapa 4:</b> Instalação de inserts</p>		<p>- Colagem de inserts roscados* metálicos com adesivo</p> <p>* Inserts para fixação de partes móveis</p>
<p><b>Etapa 5:</b> Montagem das estruturas</p>	<p>- União das peças estruturais com adesivo</p> 	<p>- Uso de dispositivos de travamento durante cura do adesivo</p> 
<p><b>Etapa 6:</b> Montagem final do móvel</p>		<p>- Fixação das partes móveis por inserts e parafusos</p>

A qualidade de montagem para os móveis de aeronaves executivas requer que a linha de junção das peças fique quase imperceptível. Esta característica, mostrada na Figura 4.6, é viabilizada na rota de processo 2 não só pelas características de usinagem, mas também pelo uso de adesivos transparentes e de fácil remoção de resíduos, complementados por alguma técnica de retoque quando necessário.

Figura 4.6 Exemplo de junção quase imperceptível de peças em fórmica para atendimento ao requisito visual de móvel aeronáutico.



A definição pela rota de processo 1 ou 2 deve ser realizada durante a concepção do produto, quando são escolhidas as técnicas e materiais de junção da estrutura do móvel para atender aos requisitos de resistência e rigidez das junções estruturais, mostrados na sequência da Figura 4.2. Como a definição exige certificação pelas autoridades aeronáuticas, e implica, para o fabricante, na realização de centenas a milhares de ensaios para comprovação do atendimento aos requisitos, alternar entre um tipo de processo e outro demanda investimento para a revisão, tanto da estrutura fabril, como de todo o projeto aeronáutico.

Os principais tipos de acabamento atualmente em uso nos móveis aeronáuticos são os laminados e tecidos colados, as tintas e os vernizes. A tecnologia atual de aplicação destes acabamentos no contorno das peças fabricadas em painéis com núcleo em forma de colmeia requer o preenchimento do núcleo exposto com resina, como mostrado na etapa 1 das rotas de processo 1 e 2, nas Figura 4.4 e 4.5.

Assim como a técnica de junção das peças influencia na definição do momento de aplicação dos acabamentos no processo de fabricação, a aplicação dos acabamentos nas peças individualmente, ou nas estruturas montadas, influencia na técnica de colagem dos laminados, na seleção dos adesivos, e na qualidade da aplicação das tintas e dos vernizes.

A aplicação dos laminados colados nas estruturas montadas requer adesivos tipo contato, e a pressão para colagem é normalmente manual. Em alguns casos específicos, onde a pressão manual uniforme é difícil de ser aplicada, são utilizadas bolsas de vácuo. A instalação destas bolsas de vácuo é relativamente demorada, assim como o tempo em que a peça deve permanecer no vácuo. Já a colagem dos laminados diretamente nos painéis ou nas peças individualmente pode utilizar outros tipos adesivos como os do tipo epóxi. A manutenção da pressão entre as partes a serem coladas até a cura do adesivo é normalmente aplicada de maneira uniforme em prensas, e o processo acelerado por aquecimento.

A dificuldade de acesso para aplicação de acabamentos na rota de processo 1, onde a estrutura está montada, pode implicar em riscos ergonômicos aos trabalhadores, e são causa de geração de defeitos e necessidade de retrabalhos. Na colagem de laminados, por exemplo, a execução de pressão manual e possivelmente não uniforme pode causar descolamentos. Na aplicação de tintas e vernizes, o lixamento e a aspensão uniforme de tintas e vernizes nos cantos do fundo do móvel são difíceis e podem causar defeitos como o aspecto de casca de laranja.

A aplicação de tintas e vernizes na rota de processo 1 também requer mais área de cabine para aplicação e cura, o que pode implicar em maiores

custos energéticos para manutenção de temperatura, umidade e pressão controladas nas áreas fabris.

As tintas, os vernizes, os laminados sintéticos tipo fórmica, os laminados de madeira, e os adesivos atualmente em uso nas aeronaves executivas são susceptíveis às variações das condições ambientais de temperatura e umidade. Isto normalmente requer climatização das instalações industriais, dependendo do local onde a fábrica está instalada, para processamento e controle da qualidade do produto.

A qualidade do processo de aplicação destes acabamentos também é determinada por variáveis como:

- Rugosidade e limpeza das superfícies;
- Quantidade e uniformidade de adesivo aplicado;
- Pressão, tempo e temperatura de colagem;
- Uniformidade das espessuras de camada de tintas e vernizes.

Estas variáveis, muito dependentes do fator humano, fazem com que a rota de processo 1 não seja tão robusta para garantir baixa taxa de defeitos e altos níveis de qualidade no produto durante seu uso.

Apesar das limitações de precisão, a rota de processo 1 é a mais difundida na indústria aeronáutica, devido a fatores como, possivelmente, o menor custo relativo de implantação em relação ao da rota 2, já que não requer recurso de usinagem de precisão e 5 eixos e o envolvimento de consumo de horas de trabalho semelhante na produção dos móveis. Além disso, a rota de processo 1 também facilita a fabricação de móveis nos quais se desejam superfícies curvas, formadas pelo corte e dobra dos painéis (como, por exemplo, o detalhe “e” da gaveta ilustrada na Figura 3.2). Também tem maior flexibilidade de uso de tipos diferentes de acabamento do produto, não havendo necessidade de revisão dimensional e trabalho adicional do projetista. A gestão e controle do produto na linha de produção também são facilitados, visto que as peças seguem unidas para as etapas seguintes do processo.

Em contraposição, a rota de processo 2 tem a vantagem de facilitar a incorporação de algum nível de automação que pode reduzir custos industriais

e melhorar a robustez do produto final. Soluções de automação prontas da indústria de mobiliário em madeira podem ser incorporadas na rota de processo 2 pelo fato das peças serem processadas individualmente até a última etapa da fabricação, quando são unidas para construir o móvel.

Foram constatados exemplos de automação de atividades insalubres e críticas para o bom resultado do processo, como o lixamento de painel sanduíche para uniformização das superfícies e adesão dos acabamentos, e de atividades relacionadas aos processos de aplicação de acabamentos, como aplicação de cola, colagem de laminados, e aspersão de tintas e vernizes.

Outra vantagem potencial da incorporação da automação na rota de processo 2 também pode ser a diminuição da necessidade de especialização da mão de obra.

A rota de processo 2 também pode permitir o envio das peças com acabamento para montagem dos móveis no local onde eles serão instalados na aeronave, a exemplo da indústria de móveis residenciais seriados para cozinhas [130]. Esta medida pode reduzir os volumes transportados e os custos logísticos, embora tenha sido observado que, atualmente, os fabricantes que adotam a rota 2 finalizem a montagem dos móveis antes do envio aos clientes localizados em diferentes partes do mundo. A otimização do transporte pode ser também uma importante estratégia para minimizar os impactos ambientais do produto, como indicado por estudo de ciclo de vida de mobiliário residencial [131].

## **4.2 Análise de perdas no processo de fabricação**

### **4.2.1 Atividades necessárias que não agregam valor ao produto**

A análise dos tempos de agregação de valor das etapas do fluxo processo de fabricação do gabinete modelo, mostrado na Figura 4.7, baseada no mapeamento apresentado na Figura 4.8 e no Apêndice A, permite verificar que:

- a) das atividades não agregadoras de valor ao produto, 79% são devido a necessidades impostas pelas atuais tecnologias de materiais e processos;
- b) 10% são desperdício puro que poderiam ser eliminadas com ajustes e melhorias de processo; enquanto que
- c) somente 11% do total das atividades de fabricação realmente agregam valor.

Figura 4.7 Distribuição dos tempos de processamento entre as etapas da rota de processo 1 para o gabinete modelo: tempos percentuais de agregação de valor em cada etapa e distribuição percentual da agregação de valor no tempo total de processamento.

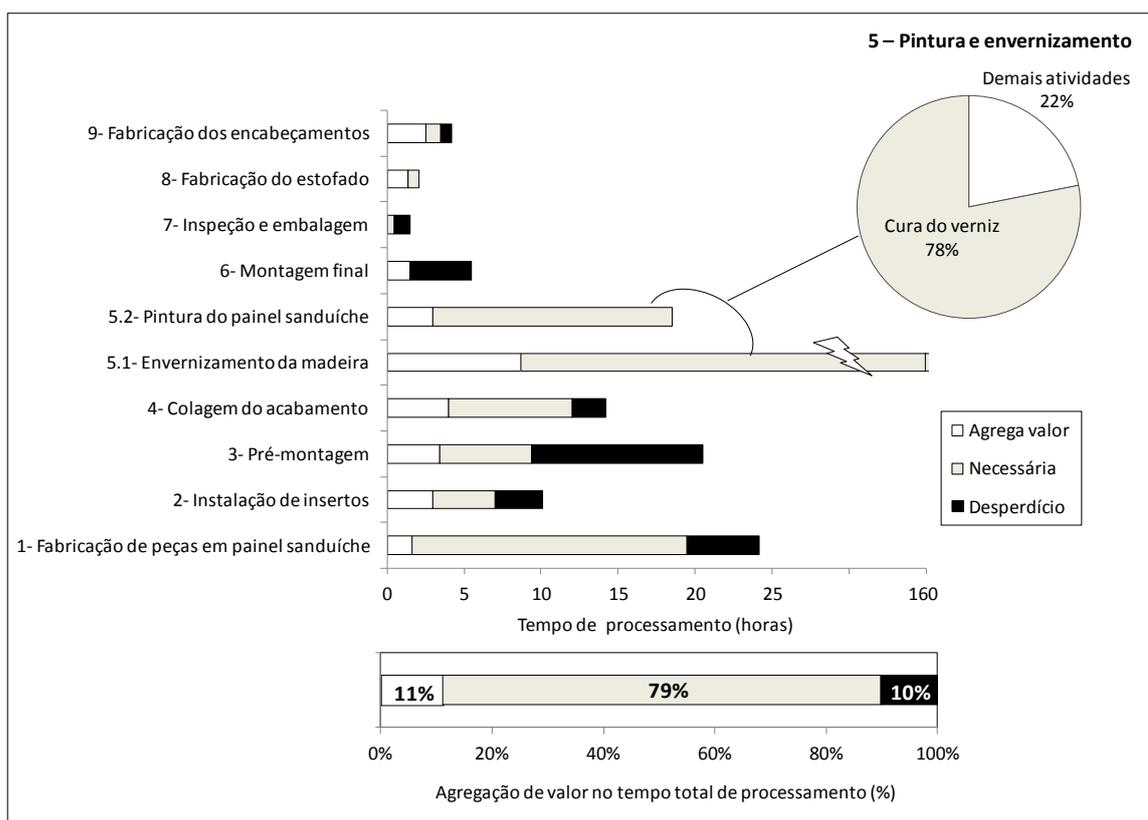
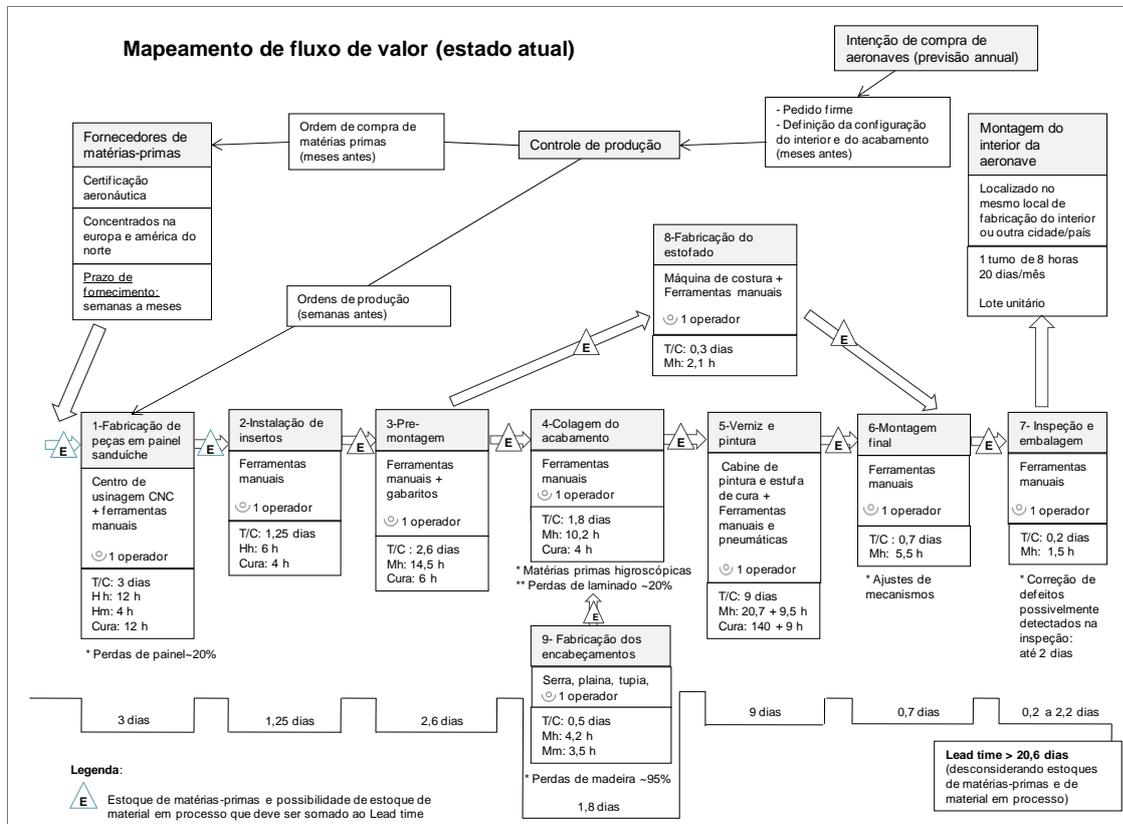


Figura 4.8 Mapeamento de fluxo de valor para o estado atual do gabinete modelo, fabricado pela rota de processo 1.



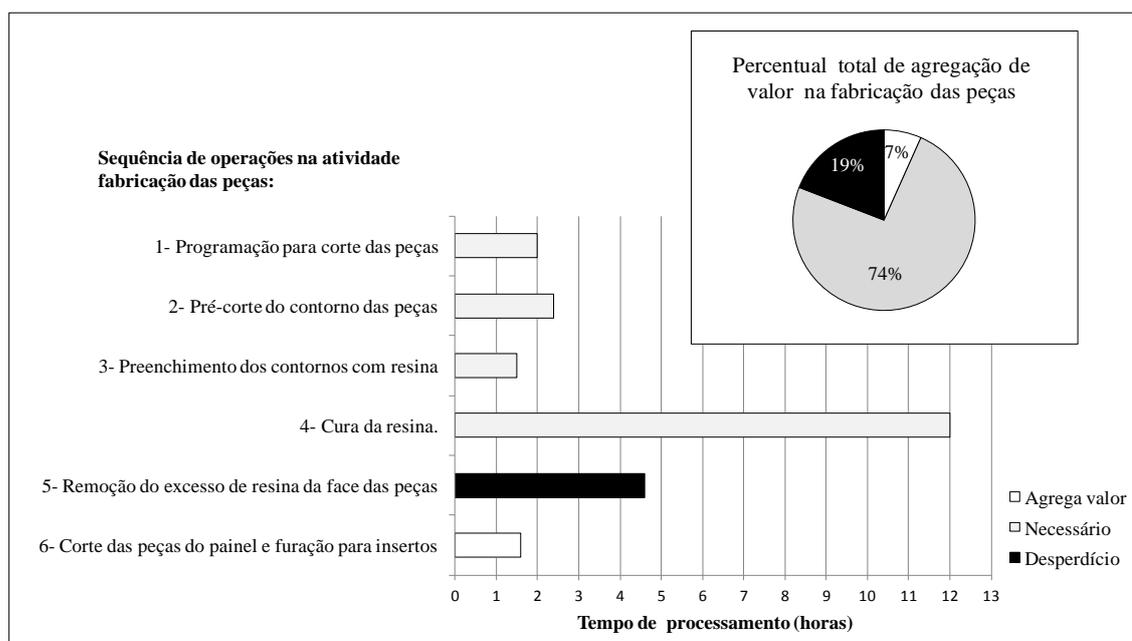
A cura das tintas e dos vernizes é a principal responsável pela adição de tempo no ciclo de produção dos móveis. Os processos de pintura e aplicação de verniz, correspondentes à etapa 5 do fluxo mostrado na Figura 4.8, representam 44% (9 dias) do ciclo de produção do móvel, e, nestes processos, 78% do seu tempo são consumidos em atividades de cura, como mostrado na Figura 4.7.

Além do impacto das características de cura das tintas e dos vernizes no ciclo de produção dos móveis, muitos dos vernizes utilizados requerem aplicação de várias camadas, intercaladas com operações de lixamento, para obtenção dos padrões estéticos desejados, o que também é um fator de aumento do ciclo de produção.

A segunda etapa responsável por adição de ciclo ao processo é a etapa 1 de fabricação de peças em painel sanduíche (Figuras 4.7 e 4.8). Nesta etapa,

74% das operações são necessárias somente em função das características dos painéis e da forma como são processados, como mostrado na Figura 4.9.

Figura 4.9 Agregação de valor na etapa 1 de fabricação de peças em painel sanduíche para o gabinete modelo.



As operações para preenchimento dos contornos das peças com resina somente são necessárias para colagem dos acabamentos porque o núcleo dos painéis, em forma de colmeia, não é sólido. Os acabamentos dos tipos pintura e laminado colado requerem uma superfície plana e livre de impurezas para serem aplicados. O preenchimento dos contornos com resina implica nas operações de programação de corte em máquinas de usinagem, de abertura de canais nas regiões de contorno das peças nos painéis, de aplicação de resina, e espera pelo tempo de cura.

As demais etapas de processamento, que, em menor percentual, possuem atividades necessárias, mas que não agregam valor ao produto são, em ordem de relevância, como mostrado na Figura 4.7:

- Etapa 4: Colagem do acabamento
- Etapa 3: Pré-montagem, e
- Etapa 2: Instalação de insertos

Em todas estas etapas, o tempo de cura dos adesivos é o fator de maior impacto no tempo de ciclo. Na colagem dos acabamentos destaca-se também o tempo gasto na operação de corte de laminados para colagem nas peças.

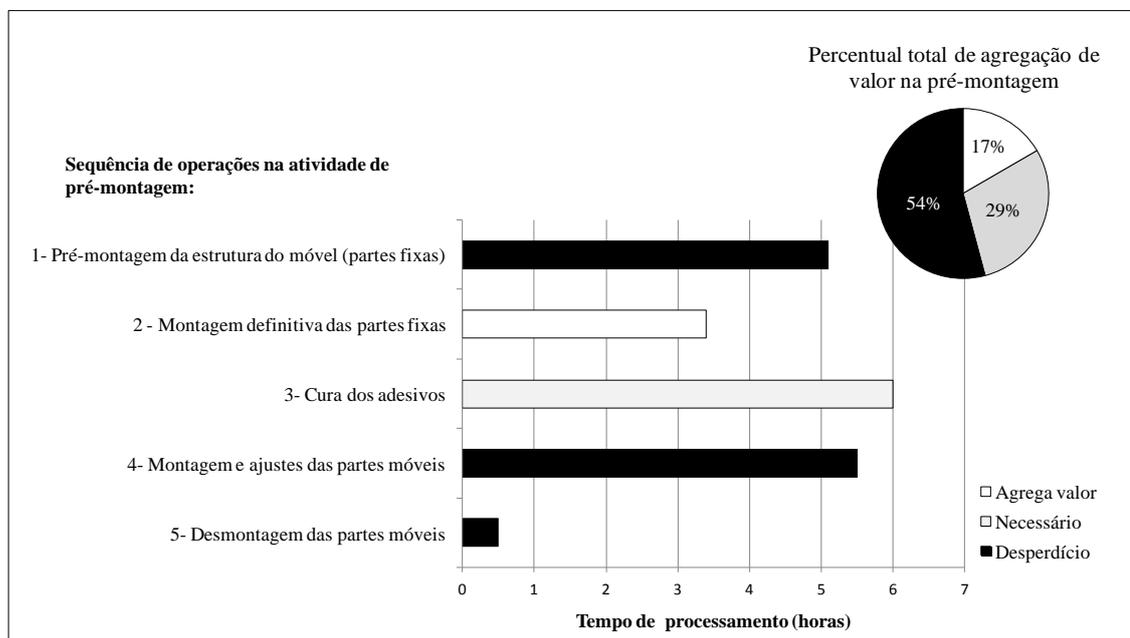
#### **4.2.2 Desperdícios de tempo no ciclo de produção e de matérias-primas**

Perdas de tempo no ciclo de produção, e de materiais, são categorias de desperdícios que poderiam ser reduzidos ou eliminados por modificações nas tecnologias de processamento.

A principal tecnologia envolvendo acréscimo no tempo de ciclo nesta categoria é a de corte de painel sanduíche para fabricação das peças, que faz com que 54% do tempo da etapa 3 de pré-montagem seja desperdício, como mostrado nas Figura 4.7 e 4.10.

A baixa precisão de corte implica na necessidade de montagem das partes móveis, como portas e gavetas, para ajustes dimensionais. Após a montagem e ajustes, estas partes são desmontadas para aplicação dos acabamentos.

Figura 4.10 Agregação de valor na etapa 3 de pré-montagem para o gabinete modelo.



Os acréscimos de tempo de ciclo nas demais etapas do processo, mostrados como desperdício na Figura 4.7, são principalmente devidos às técnicas de aplicação de resina ou adesivo, de colagem dos acabamentos, e de montagem de partes móveis como portas e gavetas.

Na etapa 1 de fabricação de peças em painel sanduíche, e na etapa 2 de instalação de insertos, as técnicas utilizadas para aplicar a resina de preenchimento de contorno das peças, e o adesivo para colagem dos insertos, deixam resíduos que necessitam ser removidos por lixamento.

Na etapa 4 de colagem dos acabamentos, o desperdício está associado a operações de lixamento de excessos. A atual técnica de posicionamento manual da lâmina de acabamento, sobre a estrutura e peças dos móveis, requer que as lâminas sejam cortadas sobremedida e o excesso recortado e lixado manualmente após a colagem.

Os desperdícios de matérias-primas são significativos para os painéis sanduíche, os laminados tipo fórmica, e para madeira maciça.

A produção de peças a partir de painéis sanduíche com dimensões pré-definidas requer, para a operação de corte, uma programação de usinagem para agrupamento de peças que utilizam um mesmo tipo de painel em termos de material e espessura (Operação 1 na Figura 4.9). Neste procedimento, foram identificadas perdas de até 20% de painel, que é descartado na forma de retalhos.

Na aplicação de laminados decorativos tipo fórmica na estrutura do móvel (etapa 4 na Figura 4.8), ocorrem perdas de laminado durante a atividade de modelagem nos painéis sanduíche, principalmente quando há padrões decorativos que devem se alinhar de uma peça para outra. Perdas superiores a 20% também foram identificadas neste processo.

Os acabamentos em madeira maciça, aplicados nas bordas de peças como mesas durante a execução da etapa 4 de colagem dos acabamentos, possuem um processo de fabricação com percentual de perdas de matérias-primas muito elevado. Embora o processo de fabricação mostrado na etapa 9 das Figuras 4.7 e 4.8 seja de ciclo rápido, e as peças em madeira fabricadas estejam em pequeno percentual no produto acabado, as perdas de matéria-prima identificadas chegaram a 95%. Isso não só no processo de usinagem, mas também na seleção de pranchas de madeira sem defeitos como furos, trincas ou nós, e que harmonizem com os laminados.

#### **4.2.3 Perdas devido às estratégias de uso dos materiais no produto, de suprimento de matérias-primas e de expedição do produto acabado**

Perdas devido às estratégias de uso dos materiais no produto foram relacionadas às escolhas dos mecanismos de movimentação de partes articuladas dos móveis.

Na etapa 6 de montagem final mostrada na Figura 4.8, o tipo de mecanismo utilizado para fixar partes móveis, como portas e gavetas, pode dificultar a operação caso não possua flexibilidade de ajustes, aumentando o ciclo de processamento e causando o desperdício mostrado na Figura 4.7.

A necessidade de inspeção unitária do produto no final do processo, com possibilidade de correções no produto (etapa 7 das figuras 4.7 e 4.8), revela processos anteriores incapazes de conter defeitos. Alguns destes defeitos foram relacionados à estratégia selecionada para uso dos materiais no produto. Como exemplo, a variedade e quantidade de insertos especificada para fixação dos mecanismos de movimentação na estrutura de material composto, e a adequação da escolha de um determinado tipo de acabamento ao processo de aplicação a ser utilizado.

O uso de insertos metálicos colados com adesivo, mostrado na etapa 2, nas Figuras 4.7 e 4.8, é um recurso muito comum para união de peças em material composto. Quando uma grande quantidade e variedade de insertos são utilizados no projeto, além da necessidade de maior volume de estoques e gestão de materiais, perdas com grande impacto na fabricação podem ocorrer, por exemplo, se insertos forem instalados em posição incorreta e a troca for identificada somente na montagem final do móvel.

A aplicação das tintas e vernizes nas estruturas de móveis montadas (etapa 5 nas Figuras 4.7 e 4.8) impacta não somente no ciclo de produção, pela dificuldade de acesso na preparação das superfícies (lixamento) e aspersão. Eles mas também são causa de desperdícios pela maior probabilidade de formação de defeitos e consequente necessidade de retrabalho.

Perdas econômicas devido às estratégias de suprimento de matérias-primas e de expedição de produto acabado podem ser significativas para os fabricantes de interiores aeronáuticos, dependendo de sua localização, e da localização de seus clientes. O fluxo de informações da Figura 4.8 mostra que a maioria dos fornecedores de matérias-primas está localizada no eixo América do Norte-Europa. Fabricantes fora deste eixo, como o Brasil, tendem a ter maiores custos logísticos e necessidade de estoque de matérias-primas. O fluxo da Figura 4.8 também mostra que é comum o local de produção dos móveis estar localizado em outros países ou continentes, relativamente ao local de instalação dos móveis nas aeronaves, e, nestes casos, o transporte dos

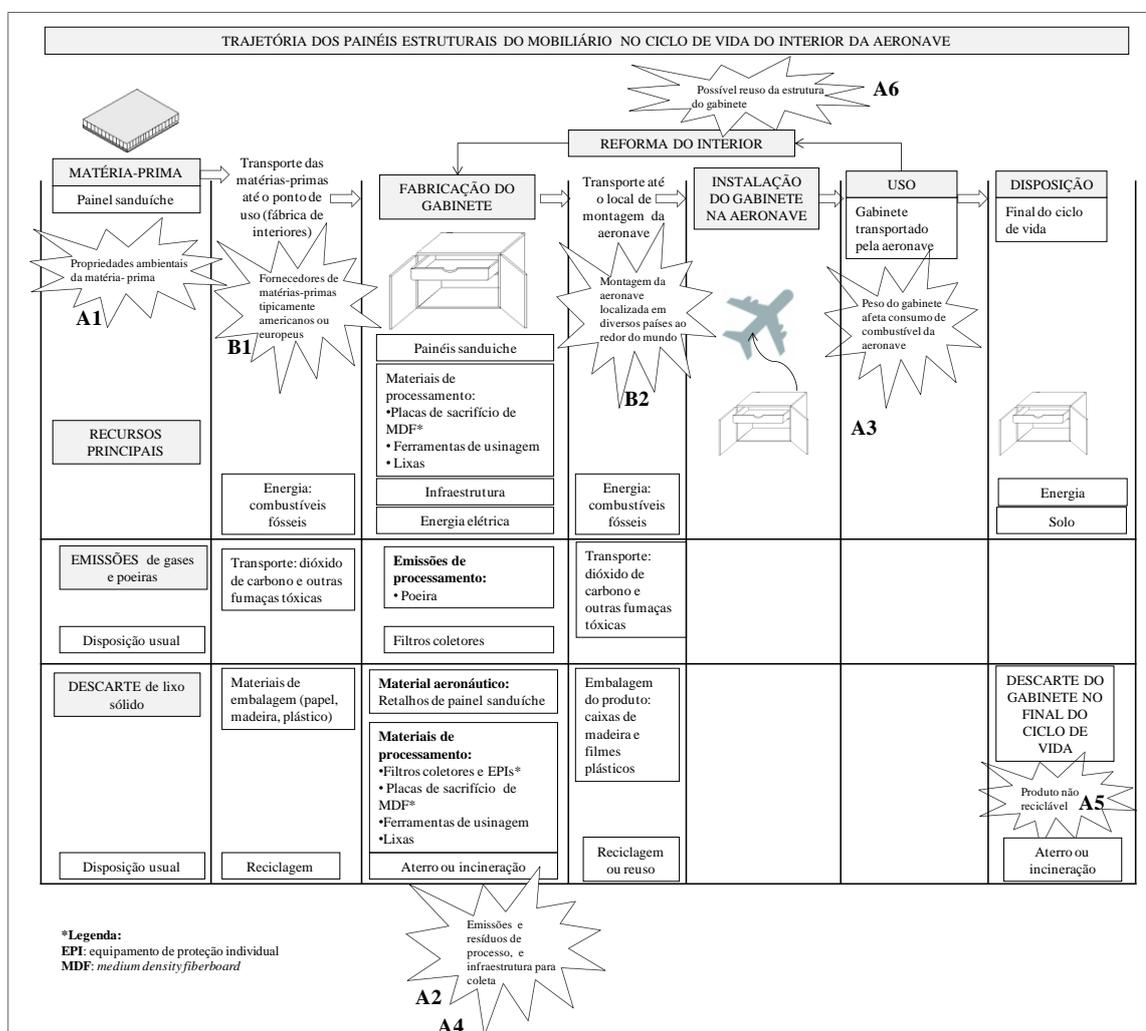
móveis montados da fábrica até o local de instalação pode ser logisticamente oneroso.

### **4.3 Análise do impacto ambiental dos materiais e processos**

#### **4.3.1 Problemática ambiental dos materiais empregados**

Os principais materiais constituintes dos móveis para interiores de aeronaves são os painéis sanduíche, principalmente os de material composto, representando mais de 90% do volume total. A análise da trajetória de painéis do estudo de caso ilustrado na Figura 3.4, ao longo do ciclo de vida do móvel, resultou na identificação dos seguintes aspectos relevantes para a sustentabilidade ambiental do produto, também indicados por letras e números na Figura 4.11:

Figura 4.11 Aspectos de sustentabilidade no ciclo de vida dos painéis sanduíche do estudo de caso, utilizados na produção de móveis aeronáuticos.



### A) Aspectos relacionados às propriedades químicas e físicas do painel sanduíche.

A1) Composição contendo materiais ou substâncias tóxicas, de fontes não renováveis.

Os painéis sanduíche são produzidos a partir de resinas termofixas que utilizam precursores tóxicos como fenol, reforçadas por fibras sintéticas, ambas de fontes não renováveis. Os componentes químicos, apesar de inertes nos

painéis, liberam particulados durante a fabricação dos móveis que podem causar irritações na pele, problemas respiratórios se inalados, e até doenças crônicas se a exposição a estes agentes for por tempo prolongado [129].

O consumo de recursos para produção e processamento destas matérias-primas indica que elas são as principais responsáveis pelos impactos que contribuem para as emissões de dióxido de carbono na etapa de manufatura do produto, como apontado, por exemplo, em estudos do ciclo de vida da aeronave Airbus 380, apesar deste tipo de material representar somente cerca de 10% do total do peso da aeronave [36, 132].

### A2) Demanda energética para fabricação dos móveis.

Os processos de corte, furação e lixamento de painéis sanduíche para produção dos móveis aeronáuticos liberam particulados insalubres [15]. Este material insalubre requer infraestrutura de fábrica para ser coletado por sistemas de aspiração. Os sistemas de coleta acrescem o consumo energético para a produção dos móveis, sem que esta energia esteja associada diretamente aos processos de transformação do produto.

### A3) Demanda energética e poluição durante o uso das aeronaves.

O consumo de combustível de uma aeronave está diretamente associado ao seu peso. E quanto maior o consumo de combustível, maior a poluição pela liberação de dióxido de carbono e outras fumaças tóxicas [26]. O impacto ambiental de uma aeronave devido ao consumo de combustíveis durante seu uso é de aproximadamente 90% do impacto total, quando todas as outras fases do ciclo de vida são consideradas [133].

O peso do material é, portanto, uma das propriedades mais importantes no projeto dos móveis, e a baixa densidade do painel sanduíche contribui para a redução do impacto ambiental das aeronaves.

A2, A4, A5 e A6) Descarte de resíduos e disposição dos móveis no final do ciclo de vida.

O painel sanduíche descartado na forma de retalhos no processo de fabricação, e nos móveis no final do ciclo de vida, tem como atual destino o descarte em aterros industriais ou incineração. As propriedades deste material fazem com que seja quase impossível reciclá-los [82,134].

A possibilidade de reciclagem dos móveis no final do ciclo de vida pode ainda ser dificultada pelo atual uso de insertos metálicos e de pinos como elementos de fixação dos painéis sanduíche. Estes materiais metálicos estão tão incorporados nos painéis com adesivos que sua remoção pode ser muito trabalhosa.

Apesar das dificuldades de disposição e reciclagem dos painéis sanduíche, seu uso tem sido justificado pelo benefício de possibilitar redução de peso no produto aeronáutico, reduzindo o impacto ambiental na fase de uso da aeronave. E também pelo fato dos produtos aeronáuticos serem produzidos em baixa quantidade comparados, por exemplo, aos automóveis, e por terem longo ciclo de vida. O que abre espaço para desenvolvimentos direcionados para a redução do impacto ambiental destes materiais [36, 82, 133, 135].

Reformar os componentes do interior durante o ciclo de vida do produto é uma prática comum em oficinas de suporte e manutenção de aeronaves. Durante aproximadamente 20 anos de uso dos móveis, estes podem se desgastar e/ou tornar-se esteticamente obsoletos. O tempo médio de vida do mobiliário aeronáutico é sete anos [136]. Uma das técnicas de reforma consiste em trocar os materiais de acabamento mantendo a estrutura em painel sanduíche. A remanufatura pode ser considerada uma forma de estender o tempo de vida do interior da aeronave, minimizando os impactos ambientais relativos ao uso de materiais compostos. A remoção dos materiais de acabamento para substituição, entretanto, é uma operação que atualmente utiliza de solventes e força mecânica para descolamento dos adesivos, o que pode degradar a superfície dos painéis.

## **B) Aspectos relacionados ao transporte e ao conceito de fabricação do produto**

### B1) Impactos devido ao transporte dos painéis do local onde são produzidos até a fábrica de móveis onde serão utilizados.

A maioria dos produtores de matérias primas para a indústria aeronáutica está localizada na América de Norte e Europa, onde se concentram as duas maiores indústrias aeronáuticas mundiais, Boeing e Airbus. Isto afeta os produtores de interiores de aeronaves localizados fora destes continentes e que precisam importar estes materiais [29]. No balanço energético final do produto, os interiores produzidos fora do eixo América do Norte – Europa terão consumido mais combustível e liberado mais dióxido de carbono na atmosfera.

### B2) Impactos devido ao transporte dos móveis prontos até o local onde serão instalados nas aeronaves.

Na forma atual de produzir móveis aeronáuticos, eles são normalmente transportados já montados até o local de instalação na aeronave. Como a produção de aeronaves é globalizada, é comum o transporte de grandes volumes de móveis entre continentes. Esta estratégia de produção também impacta o balanço energético do produto pelo maior consumo de combustíveis, e requer mais materiais para embalagem.

Os aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental dos painéis sanduíche podem ser expandidos para os demais materiais que constituem o mobiliário.

Os materiais de acabamento, as resinas e os adesivos utilizados têm propriedades semelhantes a dos painéis. Eles possuem, em geral, substâncias tóxicas em sua composição, são produzidos a partir de fontes não renováveis, e são de difícil reciclagem após aplicação no produto. As madeiras naturais na forma sólida ou de laminados são, apesar da origem natural e renovável, em geral procedentes de árvores exóticas e não reflorestadas.

A toxicidade de alguns tipos de tintas, vernizes e adesivos pode afetar não somente os operadores durante a fabricação dos móveis, mas também os consumidores por continuar liberando vapores tóxicos nos períodos iniciais de uso.

Os materiais de acabamento e os adesivos também demandam energia não ligada diretamente aos processos de transformação do produto para se manterem estáveis durante o processamento. Esta energia é consumida para manutenção de temperatura e umidade controladas nos locais de armazenamento e fabricação.

Todos os demais materiais também são, em geral, procedentes de fornecedores localizados na América do Norte e Europa, e produzidos poucas empresas que detêm as tecnologias dos materiais para uso em interiores aeronáuticos.

#### **4.3.2 Problemática ambiental da manufatura**

Os impactos ambientais na manufatura do mobiliário são principalmente devidos às propriedades dos materiais atualmente utilizados, mas decorrem também do conceito de fabricação do produto.

No mapeamento do fluxo de valor ambiental atual da manufatura do gabinete modelo para a rota de processo 1, mostrada na Figura 4.12, a maioria dos impactos são da mesma natureza daqueles identificados no estudo de caso que analisou a trajetória dos painéis sanduíche ao longo do ciclo de vida do produto (Figura 4.11).

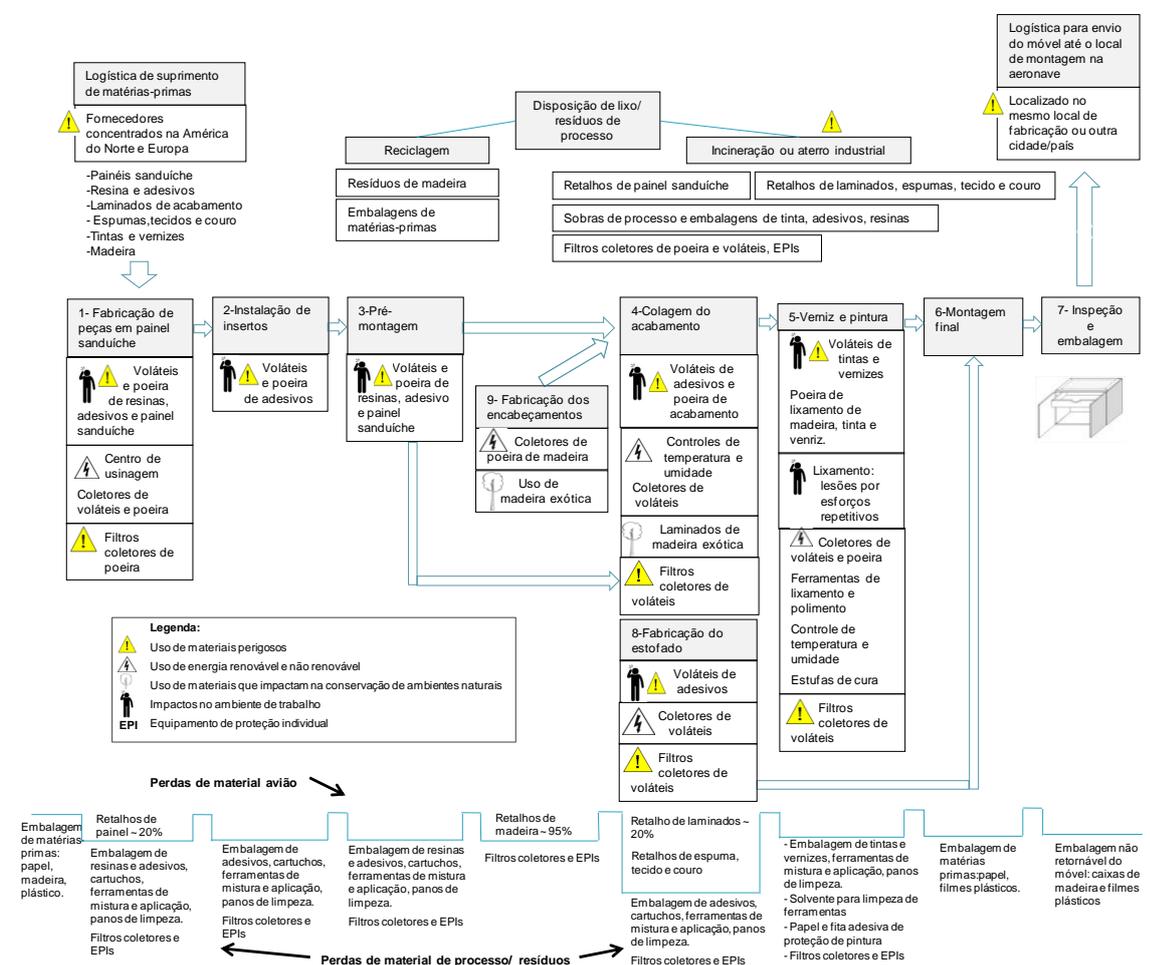
##### Impactos relativos aos materiais:

- toxicidade para os trabalhadores e para o ambiente;
- consumo de energia no processo de fabricação;
- resíduos de processamento não reutilizados ou reciclados, e
- consumo energético para transporte de matérias-primas.

Impactos relativos ao conceito e processos de fabricação dos móveis:

- descarte de resíduos por perdas no processamento e uso de materiais de consumo;
- riscos ergonômicos aos trabalhadores; e
- consumo energético para transporte do produto acabado.

Figura 4.12 Mapeamento do fluxo de valor ambiental atual da manufatura do gabinete modelo, e rota de processo 1.



Em todas as etapas de fabricação mostradas na Figura 4.12, com exceção a de Montagem final e a de Inspeção e embalagem, os materiais liberam voláteis orgânicos e/ou muita poeira. Estes voláteis e poeiras, além de prejudiciais à saúde dos trabalhadores, podem contaminar o ambiente se não forem contidos, coletados, e descartados apropriadamente. Os voláteis são

liberados durante o manuseio e cura dos adesivos, resinas, tintas e vernizes. As poeiras são geradas em operações de corte, furação, e lixamento de painéis sanduíche, de resinas, e de materiais de acabamento como laminados, tintas e vernizes [15, 56, 129, 136-140].

O uso destes materiais requer monitoramento periódico dos ambientes de trabalho e da saúde dos trabalhadores. A manutenção dos poluentes a níveis aceitáveis nos ambientes de trabalho requer sistemas industriais de contenção e coleta de resíduos. Estes sistemas consomem energia não diretamente ligada aos processos de fabricação, e consomem recursos como filtros que necessitam de descarte apropriado por incineração ou em aterros industriais.

As perdas de matérias-primas são significativas nas etapas de fabricação 1, 4 e 9 mostradas na Figura 4.12.

Na etapa 1 de Fabricação de peças em painel sanduíche, e na etapa 4 de Colagem dos acabamentos, são geradas até 20% de sobras pela técnica de corte. Estas sobras, atualmente não recicladas ou reutilizadas, são incineradas ou dispostas em aterros industriais.

Os adesivos para colagem de acabamentos na etapa 4, as tintas e os vernizes, em geral contém como veículo solventes tóxicos, como por exemplo, hexanos, xileno e tolueno [56, 137]. Estas características, somadas a susceptibilidade físico-química destes materiais às variações de temperatura e umidade no momento de uso, implicam na necessidade de controles ambientais nas áreas produtivas e sistemas de exaustão/ventilação [56-57, 137, 141]. Estes controles de temperatura e umidade também consomem energia elétrica não ligada diretamente aos processos de transformação.

Na etapa 9 de Fabricação dos encabeçamentos em madeira maciça, as perdas podem chegar a 95%. Embora um material natural de fonte renovável, estas madeiras normalmente não são provenientes de reflorestamento.

As resinas epóxi utilizadas para preenchimento dos contornos das peças na etapa 1, para colagem de insertos na etapa 2, e para ajuste dimensional de peças na etapa 3 de Montagem das estruturas, além de emitirem voláteis e liberar poeira nas operações de lixamento para remoção de excessos de resina

curada, geram resíduos de material de consumo que também necessitam descarte especial por incineração ou em aterros industriais [138]. Normalmente fornecidas em cartuchos plásticos, estas resinas requerem recipientes descartáveis para mistura e aplicação, panos e solventes de limpeza.

A utilização dos adesivos, das tintas e dos vernizes, similarmente às resinas, implica no uso e descarte especial de materiais de consumo contaminados, como panos com solventes de limpeza, papéis de isolamento, lixas, embalagens, recipientes de mistura e aplicação, equipamentos de proteção individual, e filtros dos sistemas de coleta de voláteis e poeiras.

Na etapa 5 de aplicação de verniz e pintura, as operações de lixamento requeridas para adesão de sucessivas camadas de verniz e polimento são potenciais causadoras de lesões por esforço repetitivo nos operários.

A fixação da estrutura do móvel antes da aplicação do acabamento, mostrada na etapa 3 da Figura 4.12, requer maior área de produção, maiores bancadas de trabalho, cabines de aplicação e estufas para cura de tintas e vernizes. Isto afeta diretamente o consumo energético para controle de temperatura, umidade, e sistemas de exaustão. Adicionalmente, a montagem da estrutura do móvel nesta etapa traz problemas ergonômicos aos trabalhadores pela dificuldade de acesso nas operações de aplicação de materiais de acabamento, como dos laminados, das tintas e dos vernizes.

As logísticas de suprimento de matérias-primas e de expedição de produto acabado, mostradas no fluxo de informações do mapa da Figura 4.12, indica novamente que impactos devido ao consumo de combustíveis e emissão de gases do efeito estufa podem ser relevantes para fabricantes localizados fora do eixo América do Norte-Europa, e/ou para fabricantes que despacham seus produtos prontos a longas distâncias.

A análise do gabinete modelo indicou que a expedição do móvel desmontado até o local de instalação na aeronave, possível dependendo do conceito de montagem, poderia reduzir os volumes transportados em até aproximadamente 50%, e reduzir o consumo de embalagens.

#### **4.4 Potencial de melhorias da sustentabilidade econômica e ambiental associadas aos materiais e processos.**

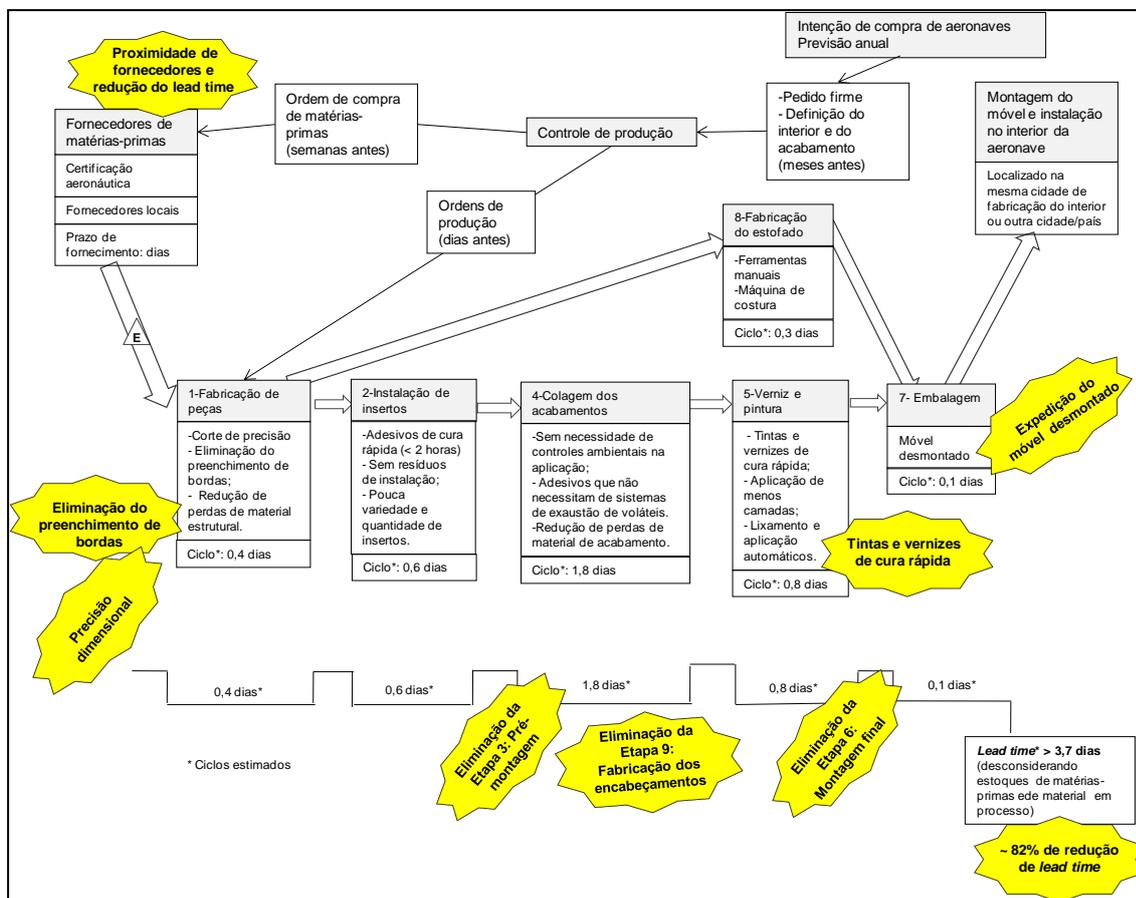
##### **4.4.1. Melhorias para redução de perdas**

As possibilidades de melhoria do desempenho econômico na fabricação do mobiliário aeronáutico, identificadas a partir do mapa de fluxo de valor na Figura 4.8 para o gabinete modelo, estão relacionadas às definições nas etapas iniciais de concepção e desenvolvimento do produto, relativas ao conceito de construção, e à escolha dos materiais e processos de fabricação.

Possíveis reduções no ciclo de produção e nos custos industriais foram projetadas no mapa futuro para o gabinete modelo, apresentado na Figura 4.13. Tomando como referência o mapa de fluxo de valor atual da Figura 4.8, em um mapa futuro sugere-se que as etapas de fabricação sejam reduzidas de nove para seis, utilizando o conceito de processo da “rota 2” indicada na Figura 4.3. Nesta condição, os materiais de acabamento (etapas 4 e 5) são aplicados nas peças e não nas estruturas montadas, logo após sua fabricação (etapa 1) e instalação dos insertos (etapa 2). Em seguida as peças são embaladas para envio até o local onde os móveis serão instalados na aeronave (etapa 7). As etapas 3 e 6, de Pré-montagem e Montagem final, podem então serem eliminadas. Sugere-se a eliminação da etapa 9 de Fabricação dos encabeçamentos pelo uso de materiais e técnicas alternativas de acabamento de bordas.

Considera-se que os móveis possam ser montados no local de instalação para reduzir custos de transporte e o tempo de fornecimento, e que fornecedores locais de matérias-primas possam ser mais privilegiados.

Figura 4.13 Potencialidades de melhorias para o mobiliário de aeronaves executivas.



A projeção apresentada na Figura 4.13 envolve mudanças nas atuais etapas de fabricação mostradas na Figura 4.8. Estas mudanças dependem da incorporação de novos materiais e de processos de fabricação com características mostradas no Quadro 4.1.

Estas características especificam ou complementam as orientações para seleção otimizada de processos durante o desenvolvimento de produtos baseada nos guias de *DFMA* [21-22, 76, 103-109], que afetam diretamente a escolha dos materiais.

Quadro 4.1 Características de materiais, processos e conceito de construção dos móveis para melhor desempenho econômico na manufatura.

Orientações atuais baseadas em <i>DFMA</i> [21-22, 76, 103-109]	Orientações identificadas para o estudo de caso	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evitar processos lentos e projetar processos contínuos para alta velocidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adesivos de cura rápida para colagem de insertos.</li> <li>• Uso preferencial de adesivos do tipo contato para colagem dos acabamentos, pois não requerem tempo para cura.</li> <li>• Vernizes que necessitem aplicação de poucas camadas para cobertura e de cura rápida.</li> </ul>	Características de materiais
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selecionar materiais que por si próprios levem a baixos custos e requisitos de produção e projeto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiais de acabamento e adesivos pouco susceptíveis às variações de temperatura e umidade.</li> <li>• Materiais de acabamento e adesivos de baixa toxicidade, que não necessitem de sistemas industriais para serem aplicados.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evitar estoque de itens utilizados em pequenas quantidades</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Priorizar fornecedores locais de matérias-primas.</li> </ul>	
-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evitar uso de madeira maciça em forma de pranchas para produção de acabamentos.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimizar o número de componentes e conjuntos</li> <li>• Minimizar as etapas de produção</li> <li>• Eliminar operações caras e desnecessárias para a obtenção da função do produto</li> <li>• Simplificar detalhes do projeto</li> <li>• Projetar componentes de modo que o número e duração das operações de usinagem sejam reduzidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soluções de acabamento de contornos de peças que não necessitem preenchimento do núcleo exposto dos painéis com resina.</li> <li>• Produção de peças estruturais com precisão dimensional suficiente para montagem sem ajustes, e com as peças já com acabamento.</li> <li>• Aplicação de acabamentos nas peças antes da montagem do móvel.</li> <li>• Colagem de insertos sem resíduos de adesivo após cura.</li> </ul>	
-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimização/eliminação de retalhos na produção de peças estruturais.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzir ao mínimo processos manuais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de automação para processos de lixamento e aplicação de tintas e vernizes.</li> </ul>	
-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimização/eliminação de retalhos no uso de materiais de acabamento.</li> </ul>	
-	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adoção de técnicas de controle de defeitos a cada etapa do processo.</li> </ul>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Padronizar e reduzir o número de materiais componentes</li> <li>• Evitar operações de fixação</li> <li>• Padronizar elementos de fixação se não for possível eliminá-los</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de pouca quantidade e variedade de insertos metálicos.</li> </ul>	Características de conceito do produto
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selecionar materiais que melhor se adequem às operações de processamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicas de junção definitiva das partes adequada para peças com acabamento.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projetar para facilitar a embalagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envio do produto acabado desmontado até o local de instalação na aeronave.</li> </ul>	

Com as mudanças propostas, o *lead time* para produção do gabinete modelo pode ser significativamente reduzido, de 20,6 para 3,7 dias, correspondendo a 82% de redução. Esta diminuição no *lead time* não considera as possibilidades de redução de estoques de matérias-primas e material em processo, não quantificados nesta pesquisa, mas que podem ser obtidas pelo desenvolvimento de fornecedores locais e pela adoção do fluxo de processo mais contínuo. A projeção considera possibilidades de redução nos custos industriais pela diminuição no consumo de matérias-primas e das perdas de processamento, entre outros fatores.

#### Etapa 1 de Fabricação de peças:

- Projeção de redução de ciclo: de 3 para 0,45 dias
  - Uso de soluções de aplicação de acabamentos nos contornos das peças que não requeiram fechamento com resina do núcleo exposto dos contornos das peças em painel sanduíche, com núcleo tipo colmeia; ou,
  - Uso de painéis com núcleo sólido.
- Projeção de redução de custos industriais:
  - Redução no consumo de painéis em até 20%: pela redução ou eliminação da geração de retalhos no processo de corte de placas através da otimização da técnica de corte, ou pela mudança na forma de produção dos painéis para construção dos móveis.

- Redução de estoques e de infraestrutura de armazenagem de painéis, devido à redução no consumo destes materiais;
- Eliminação de mão de obra nas atividades de aplicação de resina e lixamento de excesso de resina curada;
- Minimização da possibilidade de doença ocupacional nos trabalhadores por exposição a poeiras insalubres; e,
- Redução nos custos instalação e manutenção de infraestrutura para aspiração e coleta de poeiras de lixamento.

#### Etapa 2 de Instalação de insertos:

- Projeção de redução de ciclo: de 1,25 para menos de 0,6 dias:
  - Uso de adesivos de cura rápida, abaixo de 2 horas;
  - Uso de um processo de instalação que não necessite de remoção de resíduos após a cura do adesivo; e,
  - Minimização da quantidade e dos tipos de insertos.
  
- Projeção de redução de custos industriais:
  - Redução de área e recursos para armazenamento de peças durante o processo de cura dos adesivos, se este processo for mais rápido;
  - Redução de mão de obra para instalação de insertos, se o número de insertos for reduzido e o processo não implicar na remoção de resíduos;
  - Redução de estoques e da possibilidade de descarte de componentes por obsolescência, se a variedade de insertos for reduzida;
  - Redução da probabilidade de geração de defeitos por instalação de insertos em posição incorreta, se a variedade de insertos for reduzida.

### Etapa 3 de Pré-montagem

- Projeção de redução de ciclo: em 2,6 dias
  - Eliminação da atividade de pré-montagem, possível pela precisão dimensional no corte das peças na etapa 1.
  - Uso de técnicas de junção de peças que possibilitem a união definitiva das partes após a aplicação do acabamento.

### Etapa 4 de colagem dos acabamentos:

- Projeção de redução de custos industriais:
  - Redução dos custos de instalação e manutenção industrial pelo uso de adesivos e materiais menos higroscópicos, que não requeiram controles de temperatura e umidade nas áreas de fabricação para serem processados;
  - Pela possível redução de defeitos no produto se os materiais forem mais robustos às variações ambientais;
  - Uso de adesivos de composição de baixa toxicidade, que não requeiram sistemas de exaustão e coleta de voláteis;
  - Redução da possibilidade de doença ocupacional se as matérias-primas forem de baixa toxicidade;
  - Redução de mão de obra se adesivos de contato forem preferencialmente utilizados;
  - Redução de área fabril se adesivos de contato forem preferencialmente utilizados, já que as peças não necessitam aguardar pela cura do adesivo;
  - Redução de estoques se as perdas de materiais de acabamento forem minimizadas;
  - Redução no consumo de folhas de acabamento em até 20%, pela otimização dos processos de modelagem quando são utilizadas placas

de acabamento que necessitam ser cortadas e ajustadas ao tamanho das peças.

Etapa 5 de aplicação de verniz e pintura:

- Projeção de redução de ciclo: de 9 para 0,8 dias
  - Redução no tempo de cura dos vernizes e tintas para segundos, através do uso de tecnologia de cura por radiação, por exemplo;
  - Redução no número de camadas de verniz aplicadas em 50%;
  - Automação de atividades de preparação de superfícies por lixamento, para aplicação de sucessivas camadas tintas ou vernizes, ou lixamento para polimento. Estimativa de redução no ciclo da atividade em 95%; e,
  - Automação da atividade de aplicação de tintas ou vernizes por aspersão em túnel, com estimativa de 95% de redução de ciclo.
  
- Projeção de redução de custos industriais:
  - Redução de mão de obra se as formulações de vernizes necessitarem de menor número de camadas;
  - Redução de estoques de vernizes se estes forem utilizados em menor quantidade no produto;
  - Redução da possibilidade de defeitos com a aplicação sendo realizada nas peças desmontadas;
  - Redução ou eliminação de mão de obra nas atividades de lixamento e aplicação de tintas e vernizes com automação do processo; e,
  - Minimização na possibilidade de doença ocupacional nos trabalhadores por execução de esforços repetitivos ou exposição a produtos químicos.

### Etapa 6 de Montagem final

- Projeção de redução de ciclo: em 0,7 dias
  - Transferência da montagem final do móvel para o local onde ele for instalado na aeronave.
- Projeção de redução de custos industriais:
  - Redução da área de montagem na fábrica.

### Etapa 7 de Inspeção e embalagem

- Projeção de redução de ciclo: em até 2,1 dias
  - Redução ou eliminação das atividades de inspeção unitária do produto final através da adoção de técnicas de controle de defeitos a cada etapa do processo produtivo.
- Projeção de redução de custos de inspeção e reprocessamento:
  - Redução de mão de obra de inspeção; e,
  - Redução de mão de obra e materiais para retrabalho, e de possíveis atrasos na entrega do produto.

### Etapa 8 de Fabricação do estofado

- Projeção de redução de ciclo: não
  - Etapa não afeta o *lead time* do processo por ser de ciclo curto e executada em paralelo.

#### Etapa 9 de Fabricação de encabeçamentos

- Projeção de redução de ciclo: não
  - Etapa eliminada. Não afetava o *lead time* do processo por ser de ciclo curto e executada em paralelo.
  - Etapa eliminada pelo uso de soluções para decoração de bordas que não requerem o uso de madeira maciça na forma de encabeçamentos.
  - Redução no consumo de madeira na forma de pranchas em 100%.

#### Fluxo de informações: Suprimento de matérias-primas

- Redução nos custos industriais:
  - Redução do *lead time* de fornecimento e possível volume de compra de matérias-primas através do desenvolvimento de fornecedores locais, próximos aos fabricantes.
  - Pela possível redução dos estoques.

#### Fluxo de informações: Expedição do produto desmontado

- Redução nos custos industriais:
  - Pela redução dos custos logísticos de transporte do produto acabado da fábrica de móveis até o local de instalação na aeronave, quando as distâncias forem significativas.

### **4.4.2 Melhorias para redução do impacto ambiental**

A melhoria no desempenho ambiental do mobiliário aeronáutico envolve mudanças nos atuais materiais, processos de fabricação e no conceito de produto, como identificado nos estudos de caso.

Os principais requisitos direcionadores para seleção dos materiais identificados neste contexto são:

- Baixa toxicidade;
- Baixa densidade;
- Reduzida susceptibilidade às variações ambientais, como temperatura e umidade, para dispensar a necessidade de controles nos ambientes no armazenamento e produção, e consequentemente reduzir o consumo energético;
- Serem provenientes de fontes renováveis, mas que não degradem os ambientes naturais, como as madeiras exóticas de fontes não reflorestadas;
- Serem passíveis de reuso ou reciclagem;
- Serem provenientes de fornecedores locais.

A projeção de um fluxo de produção para fabricação ambientalmente mais sustentável está muito relacionada a estes requisitos de materiais. Aos quais se somam os requisitos de processo relacionados à:

- à redução da insalubridade no ambiente de trabalho;
- à redução do consumo e dos tipos de matérias-primas utilizadas;

Todos estes requisitos podem ser traduzidos para o conceito do produto, e de sua fabricação, recomendando-se o mapa futuro para fabricação do mobiliário aeronáutico da Figura 4.14. Neste mapa é indicada a busca de soluções para:

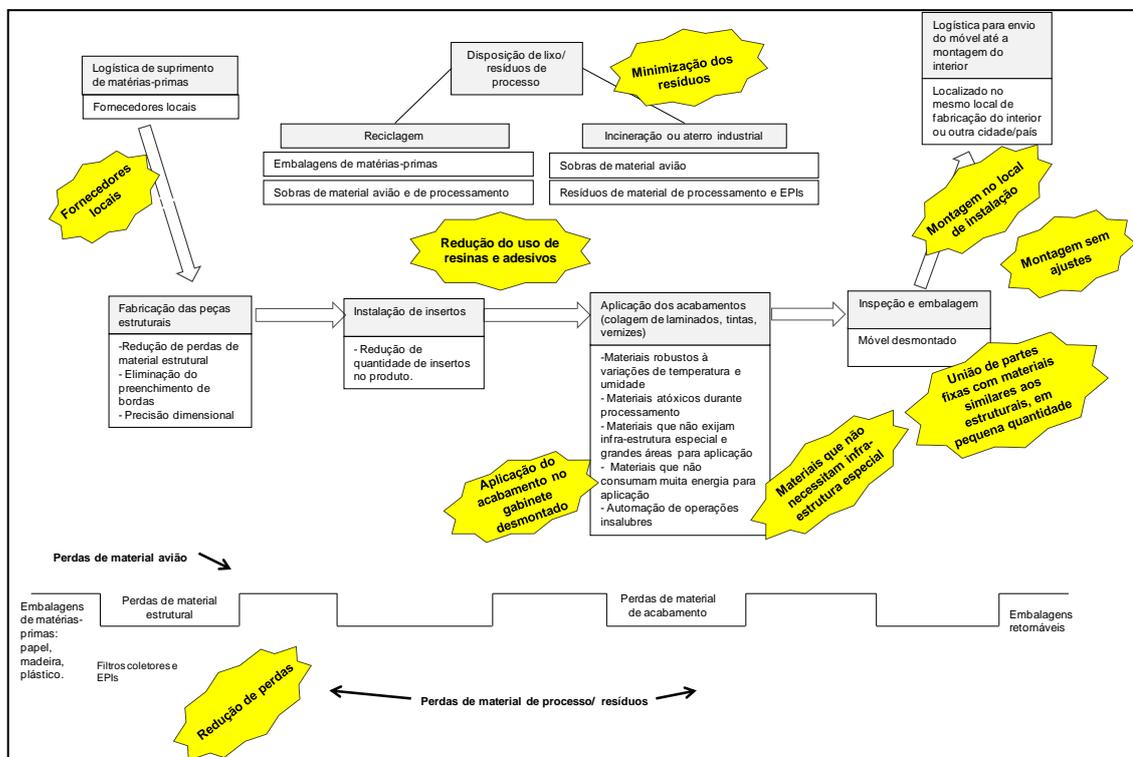
- Eliminar a necessidade de preenchimento do contorno das peças estruturais com resina para aplicação dos acabamentos:
  - para reduzir o uso de resinas, que frequentemente são materiais de fontes não renováveis e que contém substâncias tóxicas em sua composição,
  - para reduzir impactos ambientais pelo descarte de resíduos de processamento perigosos, e custos de proteção ambiental;

- para reduzir impactos à saúde dos trabalhadores e custos para preservação de sua saúde.
- Técnicas de produção de peças estruturais, e de peças de acabamento como encabeçamentos em madeira, que minimizem ou eliminem a produção de retalhos: para reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar impactos de disposição de resíduos.
- Materiais e técnicas de fabricação de peças estruturais com precisão dimensional suficiente para que a montagem não requeira ajustes: para reduzir o uso de resinas e respectivos impactos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores.
- Técnicas de fixação de partes móveis que reduzam a necessidade de insertos metálicos:
  - para reduzir a quantidade de adesivos;
  - para reduzir a quantidade de materiais de natureza diferente da dos materiais estruturais, facilitando o descarte do produto no final do ciclo de vida.
- Técnicas de união de partes estruturais que dispensem ou reduzam o uso de adesivos, ou que eliminem o uso de elementos de fixação com materiais de natureza diferente da dos materiais estruturais.
- Técnicas de montagem que possibilitem a união definitiva das peças estruturais após a aplicação dos materiais de acabamento:
  - para melhorar a ergonomia das operações de aplicação dos acabamentos;
  - para possibilitar automação de operações insalubres;
  - para possibilitar a montagem dos móveis no local de instalação na aeronave, reduzindo impacto de consumo energético no transporte.

- Materiais e técnicas de aplicação de acabamentos que não liberem vapores ou poeiras durante o processo de aplicação, como as atuais tintas e vernizes, e
- materiais e técnicas de aplicação de acabamentos de baixa toxicidade, e com sistema de aplicação que gere o mínimo de resíduos que não possam ser reciclados:
  - para reduzir impactos à saúde dos trabalhadores e custos para preservação da saúde;
  - para reduzir impactos ambientais pelo descarte de resíduos de processamento perigosos, e custos de proteção ambiental.
- Materiais e técnicas de aplicação de acabamentos que dispensem a necessidade de muita área fabril, e/ou consumam muita energia nas instalações industriais.

Como é o caso dos atuais vernizes que além de consumirem energia no processo de cura, também consomem nos sistemas industriais para exaustão e coleta de voláteis e particulados, e nos sistemas de controle ambientais para estabilidade dos materiais.
- Automação de operações insalubres aos trabalhadores, como atividades de lixamento no processo de aplicação de tintas e vernizes:
  - para reduzir impactos à saúde dos trabalhadores;
  - para facilitar a coleta e contenção de resíduos que possam ser danosos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores.
- Desenvolver fornecedores locais de matérias-primas:
  - para reduzir transporte e consumo energético;
  - para reduzir volume de estoques e área de armazenagem.

Figura 4.14 Potencialidade de melhorias ambientais na para fabricação de móveis para interiores de aeronaves executivas.



As orientações para materiais e processos visando à melhoria ambiental do móvel do estudo de caso, baseadas nos atuais requisitos ambientais gerais dos produtos aeronáuticos [26, 28-29, 142-144], são mostradas no Quadro 4.2. Estes resultados indicam o potencial de utilização da metodologia de Mapeamento de fluxo de valor para extrair e sistematizar informações com base na experiência e prática industrial, com aplicabilidade também a outros produtos e setores de produção.

Quadro 4.2 Comparação entre requisitos para melhoria da sustentabilidade ambiental do móvel do estudo de caso com aqueles atualmente utilizados nos projetos aeronáuticos.

	<b>Requisitos atuais para sustentabilidade do projeto aeronáutico [26, 28-29, 142-144]</b>	<b>Orientações para melhoria da sustentabilidade do móvel do estudo de caso</b>
Requisitos para materiais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausência de constituintes tóxicos aos seres humanos e ao ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução o uso de resinas de preenchimento de contornos das peças estruturais</li> <li>• Redução de voláteis orgânicos nos materiais de acabamento (principalmente vernizes)</li> </ul>
	<p>Uso eficiente dos recursos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidade dos materiais</li> <li>• Origem sustentável dos materiais</li> <li>• Quantidade e tipo de energia e recursos para extração e produção primária das matérias-primas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evitar uso de laminados de madeira exótica e pranchas para fabricação de acabamento de bordas</li> <li>• Alternativas sustentáveis para os atuais painéis estruturais</li> <li>• Alternativas para vernizes com alto consumo energético para cura</li> <li>• Baixa susceptibilidade dos materiais às condições ambientais para evitar consumo energético no armazenamento e processamento</li> <li>• Fornecedores locais de matérias primas para reduzir consumo de recursos para transporte</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade reduzida e boa qualidade dos resíduos gerados na produção das matérias-primas e na manufatura do produto</li> <li>• Opções sustentáveis para disposição dos componentes no final do ciclo de vida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnicas de fixação que evitem insertos metálicos (material de origem diferente do estrutural)</li> <li>• Alternativas sustentáveis para os atuais painéis estruturais, e materiais de acabamento de natureza compatível</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa densidade das matérias-primas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa densidade das matérias-primas</li> </ul>

Requisitos de processos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa toxicidade química e física dos materiais aeronáuticos e de consumo do processo produtivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automação de operações insalubres (lixamento e aplicação de tintas/vernizes)</li> <li>• Montagem sem ajustes para reduzir o uso de resinas</li> </ul>
	<p>Eficiência no uso de recursos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantidade e tipo de energia</li> <li>• Quantidade de materiais aeronáuticos e de consumo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de perdas de matérias-primas na produção de painéis e no corte de laminados</li> </ul>
	<p>Minimização da poluição:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo e quantidade de descartes atmosféricos e na água</li> <li>• Tipo e quantidade de resíduos sólidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte dos móveis desmontados até o local de instalação na aeronave</li> <li>• Redução de perdas de matérias-primas na produção de painéis e no corte de laminados</li> </ul>

Na projeção mostrada no mapa da Figura 4.14, as características de materiais, processos, e conceito de construção dos móveis para melhor desempenho econômico na manufatura listadas no Quadro 4.1 afetam positivamente a redução de alguma categoria de impacto ambiental mencionada no Quadro 3.7. Estas relações, mostradas no Quadro 4.3, indicam grande sinergia das ações para melhorar desempenho econômico do produto com aquelas para melhorar desempenho ambiental.

Não foram identificadas relações negativas, embora a incorporação de processos que envolvam corte de precisão e automação tendam a ter um custo de implantação mais elevado comparado com processos que não utilizem estes recursos. Os investimentos necessários, entretanto, podem eventualmente serem compensados pela redução de gastos com saúde e segurança dos trabalhadores e pela redução de mão de obra direta.

As soluções ambientais apresentadas na Figura 4.14 são similares às soluções econômicas propostas na Figura 4.13, com exceção daquelas focadas no aumento da velocidade de processamento para redução de ciclo de produção, como o uso de adesivos de cura rápida.

Quadro 4.3 Relações entre aspectos de sustentabilidade ambiental com possíveis soluções para melhoria do desempenho econômico da produção de móveis aeronáuticos.

Dimensão da sustentabilidade	Ambiental					Socio-ambiental		Social		Econômica	
	Ambiental		Consumo de recursos			Ambiente de trabalho		Consumidor	Sociedade	Capital humano	Custos financeiros
	Químico	Físico	Energia	Solo	Materiais	Físico	Químico	Saúde/segurança	Comunidades locais	Saúde/segurança dos	Proteção ambiental
<b>Características de materiais:</b>											
Painéis estruturais com núcleo sólido, ou que as soluções de acabamento não necessitem preenchimento do núcleo de colmeia com resina.	○	-	-	○	-	-	○	-	-	○	○
Adesivos de cura rápida para colagem de insertos.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Materiais de acabamento e adesivos pouco susceptíveis a variações de temperatura e umidade.	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-
Materiais de acabamento e adesivos de baixa toxicidade, que não necessitem de sistemas de industriais para serem aplicados.	○	-	○	○	-	-	○	-	-	○	○
Uso preferencial de adesivos do tipo contato para colagem dos acabamentos.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Uso de vernizes que necessitem aplicação de poucas camadas e de cura rápida.	○	-	○	-	○	-	-	-	-	-	-
Evitar uso de madeira maciça em forma de pranchas para produção de acabamentos.	-	○	-	-	○	-	-	-	-	-	-
Fornecedores locais de matérias-primas.	-	-	○	○	-	-	-	-	○	-	-
<b>Características de processo de fabricação:</b>											
Produção de peças estruturais com precisão dimensional suficiente para montagem sem ajustes e com as peças já com acabamento.	○	-	-	○	-	-	○	-	-	○	○
Minimização/eliminação de retalhos na produção de peças estruturais.	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-
Colagem de insertos sem resíduos de adesivo.	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-
Aplicação de acabamentos nas peça[s] antes da montagem do móvel.	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	-
Minimização/eliminação de retalhos no uso de materiais de acabamento.	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-
Uso de automação para processos de lixamento e aplicação de tintas e vernizes.	-	-	-	-	-	○	○	-	-	○	-
Adoção de técnicas de controle de defeitos a cada etapa do processo.	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-
<b>Características de conceito do produto:</b>											
Uso de pouca quantidade e variedade de insertos metálicos.	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-
Técnicas de junção definitiva das partes adequada para peças com acabamento.	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	-
Envio do produto acabado desmontado até o local de instalação na aeronave.	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-
Legenda:											
○ Relações positivas      ● Relações negativas      - Relações neutras											

## **4.5 Prospecção de soluções em materiais para um mobiliário econômica e ambientalmente sustentável**

### **4.5.1 Análise de patentes**

A busca de soluções em materiais que equacionem aspectos econômicos e ambientais envolve propriedades de materiais de complexo balanceamento.

A conciliação de aspectos estéticos dos materiais de acabamento com as propriedades físicas e químicas dos painéis estruturais, e dos adesivos, é um exemplo. Estes três grupos de materiais devem ser fisicamente compatíveis para absorver as variações de temperatura, umidade e pressão durante a operação da aeronave sem que ocorram defeitos como empenamentos, trincas ou descolamentos [69].

A compatibilidade química entre estes materiais também pode ser muito afetada pela incorporação de aditivos anti-chama, necessários para atender aos requisitos do projeto aeronáutico, e por resíduos de materiais de processamento como lixas e solventes. Nas condições de operação da aeronave, estes aditivos ou resíduos podem reagir e resultar em defeitos como manchas ou pontos de coloração diferente.

Defeitos de natureza física ou química, também podem ser resultado da susceptibilidade dos materiais à umidade, o que ocorre com grande parte das matérias-primas atualmente utilizadas na fabricação do mobiliário aeronáutico. Exemplos são os laminados de madeira natural e a fórmica que contém celulose na composição, os adesivos à base de água ou do tipo contato, e as resinas à base de poliéster utilizadas como vernizes para madeira. Os tipos de defeitos mais comuns que podem ser ocasionados por esta característica dos materiais são o descolamento dos materiais de acabamento, ou a formação de manchas nos vernizes por reação com a água.

Em relação à questão ambiental, se por um lado recomenda-se o uso de materiais naturais, provenientes de fontes renováveis, estes podem ser de

difícil adequação aos requisitos do projeto aeronáutico. Variações na composição química dos materiais naturais, por exemplo, podem ser um impedimento para atender ao requisito de inflamabilidade.

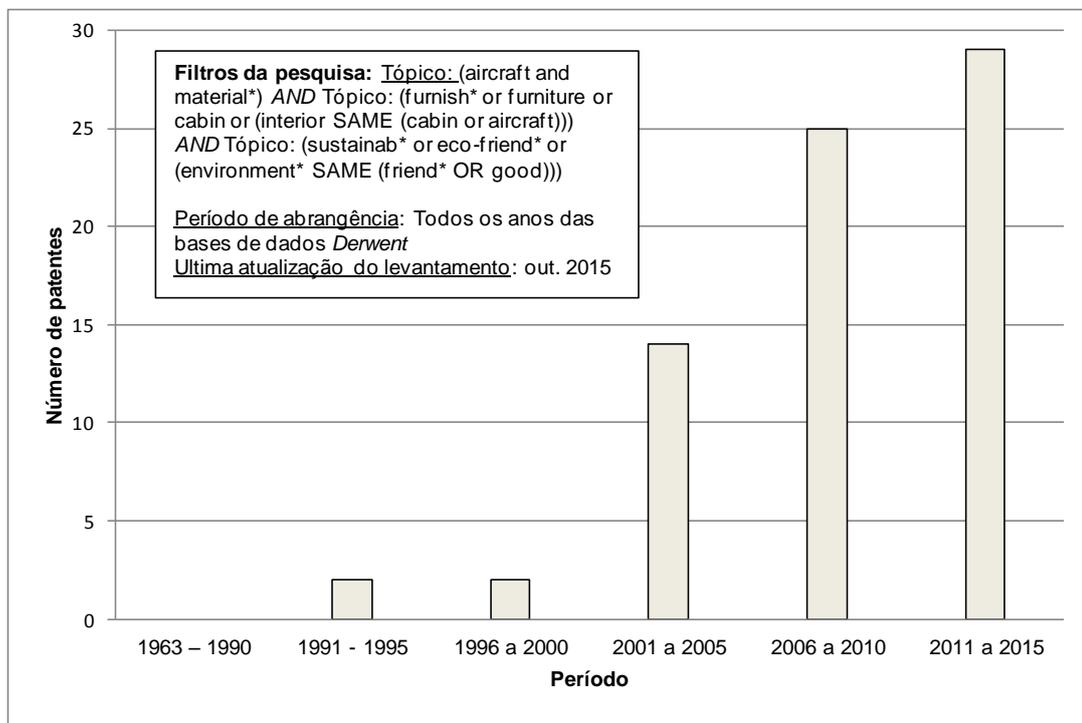
Estabilizar os materiais naturais para minimizar sua suscetibilidade a variações de temperatura e umidade também deve ser considerado no desenvolvimento e seleção de materiais para aplicação em interiores de aeronaves. Os materiais naturais podem ser muito susceptíveis a estas variáveis, o que foi identificado no estudo de caso também como impactante no consumo energético para produção do mobiliário. A estabilização é importante para evitar defeitos como empenamentos, trincas, e descolamento dos materiais de acabamento.

Outra questão de difícil equacionamento é o uso de materiais compostos leves, utilizados na estrutura dos móveis, com a possibilidade de reciclagem ou descarte sustentável das sobras de processamento, ou do produto no final do ciclo de vida.

Os materiais compostos leves, e grande parte dos materiais de acabamento atualmente em uso, têm como principal precursor o fenol para produzir as resinas epóxi ou fenólicas, e as fibras de aramida. Estas resinas e fibras estão presentes na composição dos painéis sanduíche, dos adesivos, dos vernizes, e dos laminados sintéticos como fórmica.

A análise de documentos patentes, como indicativo da evolução da busca de soluções para materiais ambientalmente mais amigáveis para interiores de aeronaves, mostra que a preocupação com a questão ambiental se iniciou nos primórdios da década de 90, com aumento significativo e crescente nos quinquênios 2001-2005 e seguintes, como apresentado na Figura 4.15.

Figura 4.15 Evolução do patenteamento associado aos materiais e à sustentabilidade para interiores de aeronaves.



Fonte: *Derwent Innovations Index*.

Nos últimos dez anos, entre 2006 e 2015, houve uma média de cinco patentes por ano, três vezes maior do que nos quinze anos anteriores.

Entre 1991 e 2005, as soluções foram principalmente relacionadas à:

- substituição de agentes expansores de espumas com potencial de destruição da camada de ozônio [145];
- eliminação de compostos halogênicos em retardantes de chama em materiais plásticos [146];
- eliminação de gases do grupo hidrogênio-cloro durante a incineração ou disposição de laminados decorativos [147]; e,
- eliminação de cromatos em tintas e revestimentos para proteção anti-corrosão [148].

Estas soluções aparentemente devem ter sido motivadas por regulamentações ambientais como o Protocolo de Montreal para substâncias que destroem a camada de ozônio, e outras legislações para eliminação de substâncias tóxicas emitidas por diversos países [35].

Nos últimos dez anos, soluções relacionadas ao atendimento a regulamentações ambientais e aeronáuticas foram direcionadas à redução de emissões residuais de compostos voláteis orgânicos em laminados decorativos para melhorar a qualidade do ar das cabines [149], a redução do uso de solventes orgânicos na fabricação de couros sintéticos e espumas [150-152], além da eliminação de compostos halogênicos. Mas neste período destacam-se soluções como a incorporação de fibras naturais para reforço de plásticos, e a aplicação de bio-plásticos na produção de painéis compósitos [153-157].

Tomando como exemplo o painel sanduíche do estudo de caso, composto por um núcleo tipo colmeia de aramida e faces de resina epóxi ou fenólica reforçada com fibra de vidro, possíveis soluções com apelo ambiental identificadas são:

- Para as faces:
  - a) substituição da fibra de vidro por fibras naturais, como fibra de coco [154];
  - b) resinas fenólicas com baixo fenol ou formaldeído livre [155]; e,
  - c) bio-plásticos a base de poliamida reforçadas com fibras de mamona [136].
  
- Para o núcleo:
  - d) tipo colmeia à base de papel celulósico [158].
  
- Para faces e núcleo:
  - e) Painel sanduíche com núcleo tipo colmeia produzidos a partir de poliactida, ou ácido polilático, ou amido de milho [156];
  - f) Painel com núcleo modelado de madeira tipo balsa e faces de material composto reforçadas com fibras [159]; e,
  - g) Painel com núcleo sólido de madeira balsa ou de espuma termoplástica, ou núcleo tipo colmeia de papel celulósico. Faces de resina biopolimérica contendo fibras de cânhamo, juta ou sisal [157].

Dentre as soluções, as mais promissoras em termos de desempenho ambiental parecem ser as que mudam conceitualmente os atuais materiais utilizados, as soluções (c) a (g). Estas soluções estão mais alinhadas com a tendência global de redução da dependência de recursos naturais não renováveis e redução de resíduos sólidos, motivadas por regulamentações ambientais em diversos países, inclusive no Brasil [32].

As soluções (a) e (b), possivelmente de mais fácil adaptação ao projeto aeronáutico, mantêm o conceito de material atual, reduzindo sua toxicidade ou minimizando seus impactos pela adição de um material atual. Entretanto, os materiais continuam sendo de difícil reciclagem e disposição no final do ciclo de vida.

As soluções de bioplásticos reforçados com fibras naturais (c) que podem vir a ser combinados com núcleos tipo colmeia celulósicos (d) e (e), ou os painéis também com núcleo tipo colmeia mas totalmente compostos por bioplásticos (e), embora ambientalmente muito promissoras apresentam uma desvantagem identificada nos mapeamentos para o móvel do estudo de caso. O núcleo tipo colmeia normalmente requer, no projeto aeronáutico, preenchimento de áreas com resina para reforço de locais que receberão elementos de fixação como insertos, trincos e dobradiças, e também preenchimento do contorno das peças para aplicação de materiais de acabamento.

A desvantagem da necessidade de preenchimento do contorno das peças em painéis com núcleo tipo colmeia poderia ser contornada pela inserção e colagem de elementos de fechamento de bordas [15, 160]. Entretanto, os materiais disponíveis nem sempre atendem aos requisitos estéticos do projeto aeronáutico.

Neste sentido, as soluções (f) e (g) de painel com núcleo sólido de madeira balsa, parecem ser mais adequadas no contexto das oportunidades de redução de perdas e melhorias ambientais identificadas na pesquisa, considerando que podem eliminar a etapa de processo de preenchimento de regiões de colmeia com resinas. Os painéis com núcleo sólido também podem

acomodar melhor soluções alternativas de materiais e técnicas de junção de peças provenientes da indústria moveleira do segmento residencial.

Entretanto, o uso de painéis sólidos de madeira pode vir a crescer peso ao projeto aeronáutico, que deve ser ponderado com a possível redução do uso de resinas. A densidade da madeira balsa é em média  $155 \text{ kg/m}^3$ , quase cinco vezes maior que a densidade de um painel do tipo sanduíche com núcleo de aramida atualmente empregado nos móveis (painel de espessura 13 mm, densidade  $32 \text{ kg/m}^3$ ) [49, 157, 159].

Os painéis com núcleos de espuma termoplástica [157] são mais aplicáveis para uso não estrutural, como revestimentos de teto e laterais de cabine, devido à sua baixa resistência mecânica e propriedade de isolamento acústico.

#### **4.5.2 Análise por analogia de segmentos de mobiliários residenciais e náuticos**

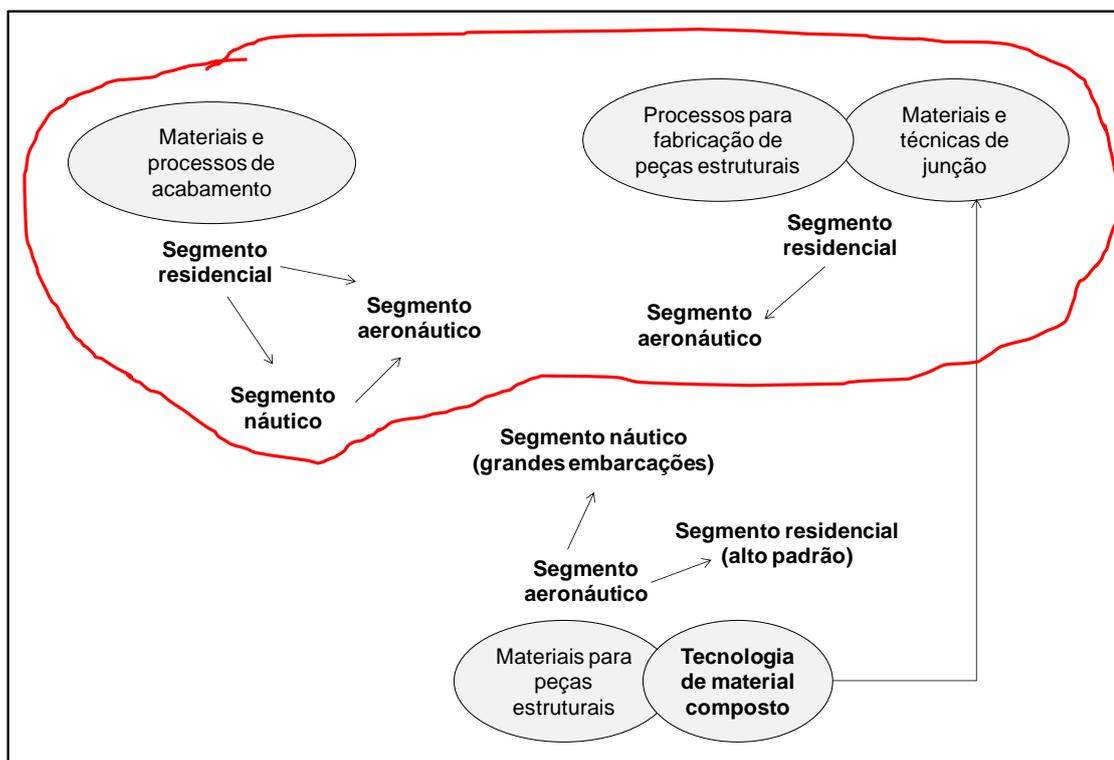
A análise dos segmentos de mobiliário náutico e residencial, como estratégia para acelerar o desenvolvimento de soluções para as aeronaves executivas, indicou que o segmento residencial é o que parece ditar as principais tendências no uso de tecnologias de materiais e processos de acabamentos, de processos para fabricação de peças estruturais, e de materiais e técnicas de junção estrutural. Tanto para a fabricação de mobiliários aeronáuticos, como para mobiliários náuticos, como ilustrado na Figura 4.16.

Os processos para fabricação de peças estruturais, e os materiais e técnicas de junção de peças no setor aeronáutico, embora oriundos do segmento residencial, são adaptados para a tecnologia de material composto.

O uso extensivo de materiais compostos para fabricação da estrutura de móveis é mais restrito ao setor aeronáutico, mas seu uso foi observado em algumas poucas peças de grandes embarcações e móveis de alto padrão. Nas grandes embarcações, por exemplo, quando o requisito peso passa a ser

importante e justifica o uso de materiais estruturais cerca de 80% mais caros em relação aos tradicionais compensado náutico e a madeira maciça.

Figura 4.16 Sentidos de direcionamento de uso de tecnologias na fabricação de mobiliários aeronáutico, residencial e náutico.



A aplicação dos materiais de acabamento desenvolvidos pelo segmento residencial em geral não é direta para os móveis aeronáuticos. Na comparação entre requisitos de materiais de acabamento para aeronaves executivas com outros segmentos de mobiliário mostrada no Quadro 4.4, inflamabilidade é requisito exclusivo para aeronaves. Adaptações na formulação de materiais desenvolvidos no setor residencial ou náutico para atender ao requisito inflamabilidade nem sempre são bem sucedidas, já que aditivos retardantes de chama podem alterar significativamente as propriedades dos materiais. Estes aditivos dificultam a obtenção, por exemplo, de vernizes com boa transparência, brilho, toque, e resistências químicas e mecânicas [56].

Requisitos de produtividade na aplicação de materiais de acabamento, como velocidade de secagem ou cura, e facilidade de aplicação, foram

indicados pelos fornecedores de matérias-primas somente para o segmento de móveis residenciais. Entretanto, foi mencionado por dois dos fornecedores entrevistados que são desejáveis na aviação executiva, mas posteriormente aos requisitos estéticos, de estilo, exclusividade e conforto.

Quadro 4.4 Principais requisitos de materiais de acabamento para móveis por segmento de aplicação.

	<b>Aeronaves executivas</b>	<b>Aeronaves comerciais</b>	<b>Residencial</b> (alto padrão/ artesanal)	<b>Residencial seriado</b> (grande consumo)	<b>Náutico</b> (embarcações de médio a grande porte)
Inflamabilidade	x	x			
À prova d'água					x
Estética, estilo	x		x	x	x
Exclusividade	x		x		x
Conforto, toque	x		x	x	x
Peso	x	x			x
Durabilidade	x	x	x	x	x
Resistências física e mecânica	x	x	x	x	x
Resistência à abrasão		x			
Resistência química	x	x	x	x	x
Velocidade de secagem/cura				x	
Facilidade de aplicação			x		

Fonte: Entrevistas com fornecedores de matérias-primas de acabamento.

No segmento residencial seriado, a principal tecnologia em uso que poderia aumentar a produtividade dos móveis executivos é a de vernizes com cura por radiação ultravioleta. Esta tecnologia poderia reduzir significativamente o tempo de processamento de tintas e vernizes, indicado como maior oportunidade de redução de ciclo na fabricação de móveis aeronáuticos no mapa de fluxo de valor projetado na Figura 4.13.

As formulações para cura por radiação ultravioleta são normalmente à base de resinas acriladas, às quais são incorporados aditivos e foto iniciadores para endurecimento do sistema ao contato com a luz ultravioleta. Também podem ser adicionados monômeros com a função de diluição para aplicação, de promoção de flexibilidade, ou de melhoria da aderência no substrato. As vantagens econômicas destes produtos são a redução da área de processamento e a rapidez do processo, pois enquanto nos sistemas convencionais a cura ocorre em dias, no sistema de cura por radiação ocorre em segundos.

O uso de cura por radiação ainda é bastante limitado na aviação executiva, acredita-se pela dificuldade em se obter formulações de qualidade satisfatória que atendam ao requisito de inflamabilidade. Outra limitação é cura dos vernizes de cura por radiação em estruturas de móveis montadas, pela dificuldade em aproximar a lâmpada de cura de maneira uniforme. Apesar disso, soluções têm sido desenvolvidas, como exemplo, resina termoplástica foto curável para revestimento de componentes de cabines aeronáuticas, entre outras aplicações [161].

Mas os benefícios desta tecnologia de cura vão além da produtividade, pois tem forte apelo ambiental. As principais vantagens ambientais desse tipo de solução, em relação aos sistemas de cura convencional por calor e evaporação de solventes, são a grande economia energética, e a ausência ou baixo teor de solventes e voláteis. Avanços na tecnologia de cura por radiação tem se concentrado em ainda melhorar o desempenho ambiental pelo desenvolvimento de: - matérias-primas renováveis, - formulações totalmente livres de solventes, ou com solventes a base de água e, - lâmpadas energeticamente mais eficientes, isentas de mercúrio e que não geram ozônio, tipo LED [162-164].

Requisitos de materiais relacionados à questão ambiental não foram listados pelos fornecedores de matérias-primas de acabamento como específicos para segmentos de móveis aeronáuticos, residenciais ou náuticos. No seu entendimento, a sustentabilidade de seu negócio depende de oferecer produtos que atendam as regulamentações ambientais, principalmente

definidas na Europa e América do Norte. Uma preocupação no desenvolvimento de matérias-primas com estas características é que estas gerem o mínimo de impacto nas fábricas onde são produzidas ou utilizadas.

Os fornecedores de tintas e vernizes têm trabalhado em desenvolvimentos de produtos que emitam menos halogênios, como cloro e bromo, e sem cromatos. Produtos à base de água, com alto teor de sólidos, ou com cura por radiação ultravioleta, com intuito de reduzir a emissão de compostos orgânicos voláteis.

Para os fornecedores de laminados como fórmica ou madeira, os direcionamentos têm sido para o uso de matérias-primas cuja produção seja eficiente no consumo de recursos naturais, e obtidas do manejo responsável de produtos florestais.

Considerando a complexidade das propriedades de materiais a serem balanceadas no projeto aeronáutico, com requisitos de diferentes naturezas, e o nível de globalização do produto, verifica-se que a estruturação de consórcios tem sido um mecanismo utilizado pela indústria aeronáutica para desenvolver tecnologias de materiais. Exemplos destes consórcios envolvendo empresas aeronáuticas, fornecedores e universidades são o PAMELA [24] e o AFRA [27], para reciclagem de aeronaves no final do ciclo de vida, e o FACE (*Friendly aircraft cabin environment*), para melhoria no conforto das cabines [165].

## **4.6 Proposta de procedimento de seleção de materiais e processos**

### **4.6.1 Seleção de materiais e processos durante o desenvolvimento do produto**

A partir dos resultados obtidos, propõe-se um procedimento para seleção de materiais e processos a ser utilizado no desenvolvimento de produto, que busca fortalecer a consideração de aspectos ambientais e de otimização da manufatura desde a fase de conceito do produto, com a



A análise do cliente (etapa 1.1), baseia-se em proposição de Costa (2009) [9], a partir da identificação de fatores de influência no uso de materiais em interiores de aeronaves executivas. Esta análise identifica o uso e a categoria da aeronave, e avalia aspectos culturais, regionais, e de tendências de uso de materiais em locais e produtos consumidos pelos potenciais clientes. O resultado da análise é utilizado para determinar requisitos para os materiais, e sua relevância, a serem aplicados na etapa de prospecção. Entre os requisitos podem ser mencionados aqueles relacionados à estética, personalização, conforto, durabilidade, e percepções de sustentabilidade ambiental.

Para a análise econômica e ambiental (etapa 1.2), é proposta inicialmente a verificação das normas ambientais e das restrições de uso de materiais e processos. Esta verificação suportará a análise do mapeamento econômico e ambiental do produto durante seu ciclo de vida, incluindo de sua da manufatura. O mapeamento pode ser conduzido nos moldes do realizado no estudo de caso desta pesquisa. Ele será a base para a identificação de estratégias de concepção do produto, a serem desdobradas em requisitos e indicadores para prospecção de materiais e processos na etapa 1.3.

- **1.1 - Etapa de análise do cliente:**

- a) Definição do propósito de uso da aeronave.
- b) Definição do operador da aeronave.
- c) Definição da categoria da aeronave baseada em seu peso, tamanho, alcance, ou tempo médio de duração dos voos.
- d) Determinação da região de uso da aeronave e dos aspectos culturais dos potenciais clientes. Determinação de como os materiais podem refletir valores, percepções e conceitos de qualidade destes clientes.
- e) Verificação de tendências de uso de materiais nas residências, locais de trabalho, lazer, e meios de transporte utilizados pelos potenciais clientes.
- f) Verificação dos materiais em uso nas aeronaves de concorrentes de mesma categoria para identificar oportunidades de diferenciação competitiva.

- **1.2 - Etapa de análise ambiental e econômica:**

- a) Verificação das normas ambientais e restrições de uso de materiais e processos nos países onde a aeronave será potencialmente vendida e utilizada. Restrições atuais e tendências.
- b) Mapeamento e análise da trajetória atual do interior da aeronave, abrangendo aspectos de sustentabilidade ambiental, em todas as fases do seu ciclo de vida.
- c) Mapeamento e análise do processo de fabricação do interior da aeronave, abrangendo questões econômicas e de valor para o cliente.
- d) Definição de objetivos e estratégias para o produto a partir das restrições e oportunidades identificadas.
- e) Definição de requisitos e indicadores para materiais e processos.

- **1.3 - Etapa de prospecção de materiais e processos:**

- a) Prospecção de materiais e processos baseada na análise do cliente, e nos requisitos e indicadores definidos para materiais e processos.

#### **4.6.3 Seleção de materiais e processos na fase de detalhamento do produto**

Na fase de detalhamento do produto (fase 2 na Figura 4.17) , é proposta uma sequência de filtros para a seleção de materiais e processos prospectados na fase de conceito do produto. Estes filtros divididos entre os estágios de projeto preliminar, de configuração, e detalhamento do produto, são mostrados na Quadro 4.5.

No estágio preliminar (2.1) são propostos dois filtros. Um para selecionar os materiais e processos que estejam em conformidade com regulamentações definidas por autoridades aeronáuticas e ambientais, como inflamabilidade e restrições ao uso de produtos químicos. Outro para avaliar, dentre escolhidos,

os de potencialmente maior receptividade pelos clientes, e que podem proporcionar maior competitividade ao produto. Para esta análise é sugerida a consideração fatores estéticos, de conforto, estilo, personalização, durabilidade, e de apelo ambiental.

No segundo estágio de configuração do projeto (2.2), os filtros para seleção dos materiais e processos consideram inicialmente os requisitos relacionados à adequação ao uso, aos limites de peso do projeto aeronáutico, e a compatibilidade entre materiais nas condições de temperatura, pressão e umidade de operação da aeronave. Na sequência, avaliação e ponderação das propriedades ambientais intrínsecas dos materiais, como peso, toxicidade, e potencial para reuso ou reciclagem. Avaliação da possibilidade de fabricação das peças ou componentes atendendo aos requisitos estéticos. Por último, avaliação do desempenho ambiental e econômico das possíveis soluções frente aos requisitos e indicadores definidos na fase de conceito do produto.

No último estágio de detalhamento do projeto (2.3), é proposta inicialmente a análise do cenário interno e externo à empresa para uso dos materiais e processos selecionados.

Em relação ao cenário externo, a disponibilidade dos materiais no cenário mundial e possíveis futuras restrições de uso. As condições de fornecimento das matérias-primas em termos de distâncias transportadas para minimizar os impactos de custos logísticos, de consumo energético e emissões de carbono. O tamanho dos lotes para evitar obsolescência, degradação, excesso de estoque, e consumo de área para armazenagem.

No cenário interno, a análise do conhecimento e experiência existentes para uso de novos materiais e processos. Isto para evitar perdas por baixa confiabilidade no produto ou no processo de fabricação. Também os impactos na infraestrutura instalada para uso destes novos materiais e processos, visto que, em geral, as instalações industriais são projetadas para durar mais tempo que o ciclo de vida de um determinado produto.

Como último filtro, a análise dos custos detalhados das soluções de materiais e processos, considerando benefícios diretos e indiretos das soluções mais sustentáveis, e a adequação ao orçamento do projeto aeronáutico.

Quadro 4.5 Filtros e requisitos para seleção de materiais e processos na fase de detalhamento do produto.

Filtros na fase de detalhamento do projeto		Requisitos para materiais e processos		
		Associados aos clientes e ao projeto aeronáutico	Associados à sustentabilidade*	Associados à otimização da manufatura*
2.1 – Preliminar	• <b>2.1.1)</b> Dos requisitos primários	• Regulamentações de segurança aeronáutica: inflamabilidade	• Regulamentações ambientais atuais e tendências	-
	• <b>2.1.2)</b> Da receptividade e competitividade	• Estética, conforto, estilo, personalização e durabilidade. • Receptividade do apelo ambiental	-	-
2.2 – Configuração	• <b>2.2.1)</b> Da adequação ao uso	• Adequação ao uso e compatibilidade entre materiais. • Adequação aos limites de peso do projeto aeronáutico	-	-
	• <b>2.2.2)</b> Das propriedades ambientais intrínsecas dos materiais		• Toxicidade • Peso • Potencial para reuso/ reciclagem	-
	• <b>2.2.3)</b> Da possibilidade de fabricação	• Possibilidade de fabricação atendendo aos requisitos estéticos	-	-
	• <b>2.2.4)</b> Do desempenho econômico e ambiental dos materiais e processos	-	• <u>Exemplos do estudo de caso:</u> - Materiais pouco susceptíveis a temperatura e umidade. - Uso reduzido de Resinas.	• <u>Exemplos do estudo de caso:</u> - Montagem das estruturas após acabamento das peças - Vernizes de cura rápida.
2.3 - Detalhamento	• <b>2.3.1)</b> Das restrições para uso dos materiais e processos	• Disponibilidade das matérias-primas	• Condições de suprimento de matérias-primas	• Condições de suprimento de matérias-primas • Conhecimento e experiência • Impactos na infraestrutura existente
	• <b>2.3.2)</b> Do custo	• Custos adequados ao orçamento do projeto	-	-

#### **4.6.4 Seleção de materiais e processos das fases de testes e refinamento, até o final do ciclo de vida do produto**

Na fase de testes e refinamento (fase 3 na Figura 4.17), a adequação, a confiabilidade e a robustez das soluções escolhidas para os materiais e processos poderão ser avaliadas.

As soluções aplicadas a protótipos em escala real podem ser validadas e ajustadas para atender às expectativas de desempenho dos materiais e do produto nas condições de uso da aeronave, e às expectativas estéticas e de conforto dos clientes.

O resultado dos testes e refinamentos deve ser suficientemente adequado para suportar o processo de certificação do interior junto às autoridades aeronáuticas.

A produção piloto na fase 4, de manufatura, deverá ser utilizada para validar as expectativas de melhora no desempenho ambiental e econômico da sua manufatura, e promover ajustes necessários para a fabricação seriada.

Na fase 5 de lançamento do produto com apelo ambiental, a manutenção e reparo dos componentes do interior devem ser simples de serem executados, consumir poucos recursos e utilizar materiais e procedimentos ambientalmente amigáveis. Também devem ser estabelecidos procedimentos e uma rede organizada para receber produtos descartados.

Apesar das iniciativas para projetar e fabricar interiores de aeronaves com menor impacto ambiental, e do desenvolvimento e aplicação de tecnologias para reduzir o consumo de combustíveis das aeronaves, e/ou, reduzir o impacto ambiental do uso destes combustíveis, as aeronaves executivas continuarão sendo um produto de alto consumo de combustíveis per capita. E, neste sentido, a minimização de impactos será um ônus para os clientes, que podem a vir adotar medidas de compensação de emissões de carbono. Tais medidas organizadas pelos fabricantes, por exemplo, no lançamento do produto [126].

Durante a fase 6, de venda do produto, o monitoramento e registro do desempenho dos materiais no projeto aeronáutico é importante para orientar o desenvolvimento de novos produtos.

Propõe-se também que os materiais e processos utilizados sejam monitorados para antecipar adequações requeridas por mudanças de cenários, por exemplo, de disponibilidade de materiais, ou de regulamentações ambientais. Assim como podem ser monitoradas as tecnologias de materiais e processos com grande potencial para melhorar o desempenho ambiental ou econômico do produto, mas que foram descartadas durante a fase de detalhamento do projeto por não estarem suficientemente maduras ou adequadas para uso aeronáutico. A possível implementação destas tecnologias pode aumentar a lucratividade do produto, ou prolongar sua fase de vendas por propiciar maior diferenciação competitiva.

O monitoramento de tecnologias também é aplicável a fase 7 de final do ciclo de vida, onde tecnologias para disposição e reciclagem do produto podem ser monitoradas visando atender futuras regulamentações relativas ao descarte de materiais.



## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, foi possível extrair as seguintes conclusões:

- A tecnologia de painéis de material composto para uso como estrutura dos móveis foi identificada como chave para a produção de mobiliário econômica e ambientalmente sustentável. Além de corresponder a aproximadamente 90% do volume de material dos móveis, esta tecnologia define as técnicas e materiais de junção, e restringe as possibilidades de uso de adesivos e materiais de acabamento, que devem ser química e fisicamente compatíveis.
- Perdas relevantes no tempo de processamento identificadas no processo de fabricação de móveis mais difundido na indústria aeronáutica, onde a aplicação dos acabamentos é realizada após a montagem das estruturas, são devidas principalmente a imposições das atuais tecnologias de materiais. São atividades necessárias mas que não agregam valor ao produto, tais como: tempo de cura e número de camadas dos vernizes utilizados para acabamento, tempo de cura de adesivos utilizados para colagem de insertos e junção de peças estruturais, e tempo de cura de resinas utilizadas para reforço e fechamento do núcleo tipo colmeia na região de contorno das peças.
- Como estas perdas independem do processo de fabricação a ser adotado, recomenda-se a busca de soluções em resinas para acabamento, e adesivos para junção estrutural com reduzido tempo de cura.
- Quanto às resinas para reforço e fechamento de contorno do núcleo tipo colmeia dos painéis, pode-se buscar uma solução alternativa pelo desenvolvimento de painéis com núcleo sólido, ou por soluções de acabamento do contorno das peças que não requeiram fechamento da colmeia.

- O conceito de manufatura adotado para fabricação dos móveis tem relação direta com o projeto do produto em termos da escolha das técnicas de junção estrutural e da tolerância de corte das peças.
- Desperdícios associados às tecnologias de processo, e que crescem o tempo de ciclo de produção, estão relacionados ao conceito de fabricação que produz peças com baixa precisão dimensional e realiza a montagem das estruturas dos móveis antes da aplicação dos acabamentos. A produção de peças com precisão dimensional, conjuntamente com a adoção de técnicas e materiais de junção não aparentes que possibilitem a aplicação dos acabamentos antes da montagem das estruturas, podem implicar em significativa redução nos ciclos de produção. Esta estratégia de produção poderia também reduzir custos logísticos e de estoque por possibilitar que montagem final dos móveis seja realizada no local onde forem instalados na aeronave.
- A indústria moveleira do segmento residencial seriado de móveis sob medida apresenta avanços significativos no uso de tecnologias de processos otimizados que poderiam reduzir os desperdícios identificados na indústria aeronáutica para o estudo de caso, sendo uma importante referência.
- Como a maioria dos fornecedores de matérias-primas está localizado na América do Norte e Europa, o desenvolvimento de fornecedores locais de matérias-primas para fabricantes localizados fora deste eixo pode também ser estratégia para minimizar custos logísticos e de estoque.
- As perdas de matérias-primas estão relacionados ao uso de placas de painel estrutural, folhas de acabamento e pranchas de madeira, dos quais se extraem as geometrias das peças pelo processo de corte. Estratégias de corte para minimização de retalhos, ou mudanças na forma de produzir os painéis estruturais, ou materiais alternativos aos laminados de acabamento e aos encabeçamentos de madeira maciça poderiam reduzir estas perdas.
- As estratégias de materiais, processos e conceito de produto para minimização de perdas e melhoria do desempenho econômico

identificadas apresentam sinergia com as estratégias para melhorar a sustentabilidade ambiental do produto e do processo de fabricação.

- Os requisitos a serem utilizados como referência na seleção de materiais para o projeto sustentável de móveis de aeronaves executivas, que também trazem benefícios econômicos e podem ser expandidos para os demais componentes do interior são: - baixa toxicidade; - baixa densidade; - boa estabilidade quando submetidos a variações de temperatura e umidade; - serem provenientes de fontes renováveis que não degradem os ambientes naturais; - serem passíveis de reuso ou reciclagem; e, - serem provenientes de fornecedores locais.
- Os requisitos para a seleção de processos são baixa insalubridade no ambiente de trabalho, e baixos índices de perdas de matérias-primas. A redução dos tipos de matérias no projeto aeronáutico também é um requisito para melhorar o desempenho econômico do processo e aumentar as chances de disposição sustentável do produto no final do ciclo de vida.
- Materiais identificados como promissores para melhoria do desempenho econômico e ambiental são os bio-plásticos reforçados com fibras naturais, e núcleo sólido, como substitutos aos atuais painéis sanduíche com núcleo tipo colmeia de aramida e faces de resina epóxi ou fenólica reforçadas com fibra de vidro. Também as resinas de cura por radiação ultravioleta para acabamento.
- Os principais requisitos de desenvolvimento identificados para possível aplicação de novos materiais ao projeto aeronáutico são: - inflamabilidade, baixo peso, resistência a umidade, durabilidade nas condições de uso da aeronave e compatibilidade com os materiais adjacentes. Para os materiais estruturais, acrescenta-se resistência e rigidez, e para os materiais de acabamento, estética, conforto e estilo.
- Expandindo os requisitos de materiais e processos, e as estratégias de projeto de produto, identificados para a produção de móveis de aeronaves executivas com melhor desempenho econômico e ambiental, um procedimento metodológico é proposto para orientar a prospecção e

seleção de materiais e processos para componentes de interiores de aeronaves. Neste procedimento os requisitos econômicos e ambientais são apresentados paralelamente aos requisitos do projeto aeronáutico, ao longo das etapas do desenvolvimento do produto.

- A utilização da metodologia de Mapeamento de fluxo de valor mostrou-se adequada para aproximar requisitos de manufatura às atividades de prospecção e seleção de materiais e processos na fase de concepção e desenvolvimento do produto, e também para integrar a questão ambiental com o projeto do produto e os processos de fabricação. O uso desta metodologia, combinada com outras formas de coleta e análise e de informações, pode ser utilizada para compilar informações essenciais para a tomada de decisão. Ela também pode facilitar a visualização e o consenso entre técnicos e decisores de diferentes áreas e formações.
- A sistemática proposta traz avanços por possibilitar o desdobramento e especificação de orientações para a otimização e melhoria ambiental propostas pelos guias de *DFMA* e *Ecodesing*, extraindo e sistematizando informações da experiência e prática industrial específicas de um determinado produto.

## 6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados obtidos, sugere-se que sejam desenvolvidas as seguintes pesquisas para o avanço do conhecimento na área:

- Materiais substitutos aos atuais painéis sanduíche a base resinas fenólicas ou epóxi reforçadas com fibras sintéticas e núcleo tipo colmeia de aramida. Painéis que atendam aos requisitos do projeto aeronáutico preferencialmente com núcleo sólido, e que sejam atóxicos, produzidos com fontes de energia e materiais renováveis, e facilmente degradáveis ou recicláveis no final do ciclo de vida.
- Técnicas e materiais de junção estrutural não aparentes para estes novos painéis que possibilitem a aplicação dos acabamentos antes das montagem das estruturas.
- Técnicas e materiais para fixação de partes móveis no mobiliário que substituam os atuais insertos metálicos, de forma a evitar a incorporação de um material de diferente natureza no painel estrutural e facilitar processos de reciclagem do produto.
- Resinas de cura por radiação ultravioleta para compor sistemas de envernizamento de madeira, ou sistemas de acabamento em resina que possam ser aplicados diretamente aos painéis estruturais, preferencialmente produzidas a partir de matérias-primas renováveis e formulações sem solventes.
- Soluções de acabamento que possam ser aplicados durante a fabricação dos painéis, reduzindo o tempo de fabricação dos móveis, e minimizando retalhos de processos de corte de peças, e de laminados de acabamentos.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AEROSPACE TECHNOLOGY STEERTING GROUP. **UK aerospace technology - an evolution**. Disponível em: <[https://connect.innovateuk.org/web/national-aerospace-technology-strategy-nats/documents?\\_20\\_folderId=3676688&p\\_p\\_id=20](https://connect.innovateuk.org/web/national-aerospace-technology-strategy-nats/documents?_20_folderId=3676688&p_p_id=20)>. Acesso em: out. 2015.
- [2] BÉDIER, C. et al. **The growing role of emerging markets in aerospace**. Disponível em: <[http://www.mckinsey.com/insights/travel\\_transportation/the\\_growing\\_role\\_of\\_emerging\\_markets\\_in\\_aerospace](http://www.mckinsey.com/insights/travel_transportation/the_growing_role_of_emerging_markets_in_aerospace)>. Acesso em: out. 2015.
- [3] PEAFFORD, N.; NBAA; **Flight 2009 pocket guide to business aircraft**. United Kingdom: Aerocomm Ltd, 2008. 368 p.
- [4] GENERAL AVIATION MANUFACTURERS ASSOCIATION (GAMA). **General aviation statistical databook & 2014 industry outlook**. Disponível em: <<http://www.gama.aero/files/GAMA%202013%20Databook-Updated-LowRes.pdf>>. Acesso em: jul. 2014.
- [5] BOMBARDIER. **Bombardier business aircraft - market forecast 2011-2030**. Disponível em: <[http://businessaircraft.bombardier.com/content/dam/bombardier/en/ownership/whitepapers/BBA\\_2011\\_Market\\_Forecast\\_English.pdf](http://businessaircraft.bombardier.com/content/dam/bombardier/en/ownership/whitepapers/BBA_2011_Market_Forecast_English.pdf)>. Acesso em: out. 2015.
- [6] NATIONAL BUSINESS AVIATION ASSOCIATION (NBAA). **Business aviation fact book 2014**. Disponível em: <[www.nbaa.org/business-aviation/fact-book/business-aviation-fact-book.pdf](http://www.nbaa.org/business-aviation/fact-book/business-aviation-fact-book.pdf)>. Acesso em: out. 2015.
- [7] NBAA BUSINESS ADVISORS. **Business aviation - an enterprise value perspective - part II, small and medium enterprises**. Disponível em: <<https://www.nbaa.org/business-aviation/NEXA-Report-Part-2-2010.pdf>>. Acesso em: out. 2015.
- [8] \_\_\_\_\_. **Business aviation - an enterprise value perspective - part I**. Disponível em: <<https://www.nbaa.org/business-aviation/NEXA-Report-Part-1-2009.pdf>>. Acesso em: out. 2011.
- [9] COSTA, F. R. **Situação atual e perspectivas de utilização de materiais no interior de aeronaves executivas**. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- [10] CENTRO TECNOLÓGICO DO MOBILIÁRIO SENAI. **Referências em Mobiliário 2008**. Porto Alegre: SEBRAE/SENAI, 2007. CD-ROM.

- [11] ANDREW WINCH DESIGNS. **Aviation**. Disponível em: <<http://www.andrew-winch-designs.co.uk/en/what-we-do/aviation/>>. Acesso em: out. 2015.
- [12] GOODRICH. **Veneer products**. Disponível em: <<http://goodrichcabinsystems.com/index.php/booth-veneers>>. Acesso em: out. 2015.
- [13] BASF. **Aerospace materials for seating components**. Disponível em: <<http://aerospace.basf.com/seating-components/>>. Acesso em: out. 2015.
- [14] COMMITTEE ON FIRE AND SMOKE RESISTANT MATERIALS FOR COMMERCIAL AIRCRAFT INTERIORS. **Fire and smoke resistant interior materials for commercial transport aircraft**. Washington D.C.: National Academies Press, 1995. 82 p.
- [15] HEXCEL. **Sandwich panel fabrication technology**. Disponível em: <[http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Sandwich\\_Panel\\_Fabrication\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Sandwich_Panel_Fabrication_Technology.pdf)>. Acesso em: out. 2015.
- [16] AEROFOAM INDUSTRIES. **Cushion materials**. Disponível em: <<http://www.aerofoams.com/Aircraft-Seating/Cushion-Materials>>. Acesso em: ago. 2014.
- [17] REGATTA TECIDOS. **Ultraleather**. Disponível em: <<http://www.regattatecidos.com.br/>>. Acesso em: out. 2015.
- [18] KYDEX. **Thermoplastic sheets - for production high-performance aircraft interior components**. Disponível em: <[http://www.professionalplastics.com/professionalplastics/KYDEX-Aircraft\\_Interiors.pdf](http://www.professionalplastics.com/professionalplastics/KYDEX-Aircraft_Interiors.pdf)>. Acesso em: out. 2015.
- [19] ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar**. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003. 102 p.
- [20] ALBIÑANA, J. C.; VILA, C. A framework for concurrent material and process selection during conceptual product design stages. **Materials & Design**, v. 41, p. 433-446, 2012.
- [21] BRALLA, J.G. **Handbook of product design for manufacturing: a practical guide to low-cost production**. New York: McGraw-Hill, 1986. 1135 p.
- [22] EDWARDS, K. Towards more strategic product design for manufacture and assembly: priorities for concurrent engineering. **Materials and Design**, v. 23, p. 651–656, 2002.
- [23] AIRBUS. **Delivering the future - global market forecast 2011-2030**. Disponível em: <[http://www.airbus.com/company/market/forecast/?contentId=%5B\\_TABLE%3Att\\_content%3B\\_FIELD%3Auid%5D%2C&cHash=22935adf92fcbbd4ba4e1441d13383](http://www.airbus.com/company/market/forecast/?contentId=%5B_TABLE%3Att_content%3B_FIELD%3Auid%5D%2C&cHash=22935adf92fcbbd4ba4e1441d13383)>. Acesso em: nov. 2011.

- [24] \_\_\_\_\_. **Process for advanced management of end of life aircraft (PAMELA)**. Disponível em: <<http://www.airbus.com/innovation/eco-efficiency/aircraft-end-of-life/pamela/>>. Acesso em: jul. 2014.
- [25] \_\_\_\_\_. **Environmental innovations**. Disponível em: <[http://www.airbus.com/company/environment/documentation/?eID=dam\\_frontend\\_push&docID=28630](http://www.airbus.com/company/environment/documentation/?eID=dam_frontend_push&docID=28630)>. Acesso em: fev. 2014.
- [26] AIRBUS CORPORATE ANSWER TO DISSEMINATE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT SYSTEM (ACADEMY). **Design for environment – eco efficiency and sustainability – G6 – issue 1**. Disponível em: <<http://www.airbus.com/company/environment/documentation/>>. Acesso em: fev. 2014.
- [27] AIRCRAFT FLEET RECYCLING ASSOCIATION (AFRA). Disponível em: <<http://www.afraassociation.org/index.cfm>>. Acesso em: jul. 2014
- [28] BOEING. **The Boeing company 2013 environment report – building a better planet**. Disponível em: <[http://www.boeing.com/aboutus/environment/environment\\_report\\_13/2013\\_environment\\_report.pdf](http://www.boeing.com/aboutus/environment/environment_report_13/2013_environment_report.pdf)>. Acesso em: fev. 2014.
- [29] EMBRAER. **Sustainability at Embraer**. Disponível em: <<http://www.embraer.com.br/Documents/sustentabilidade-eng.pdf> >. Acesso em: fev. 2014.
- [30] HUTTIG, G.; OTZIK, M. Technology roadmap for the future air transport system being efficient and environmentally sustainable. In: SIMPÓSIO DE TRANSPORTE AÉREO, 7., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Disponível em: <<http://www.tgl.ufrj.br/viisitraer/pdf/p08.pdf>>. Acesso em: out. 2015.
- [31] ANPEI. **Governo define algumas áreas contempladas pelas Plataformas do Conhecimento**. Disponível em: <<http://www.anpei.org.br/web/anpei/noticias/-/anpei/view/news?id=3061>>. Acesso em: abr. 2014.
- [32] BRASIL. **Lei n. 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: abr. 2015.
- [33] CONSÓRCIO AMORIN/ COURO AZUL /INEGI/ SET. **Life - lighter, integrated, friendly, eco-efficient aircraft cabin**. Disponível em: <<http://www.airbus.com/innovation/eco-efficiency>>. Acesso em: nov. 2014.
- [34] CAYLEY CONSORTIUM. **Industrial implementation for new flat panels from renewable polymers and natural fiber reinforcements for the aeronautical industry**. Disponível em: <[http://www.cayley.eu/fileadmin/cayley/media/docs/s\\_Report.pdf](http://www.cayley.eu/fileadmin/cayley/media/docs/s_Report.pdf)>. Acesso em: dez. 2014.

- [35] EUROPEAN COMMISSION. **Reach - Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals**. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/growth/sectors/chemicals/reach/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/chemicals/reach/index_en.htm)>. Acesso em: out. 2015.
- [36] HOWE, S; KOLIOS, A. J.; BRENNAN, F. P. Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 19, p. 34-31, 2013.
- [37] EDDY, D. C. et al. A predictive modelling-based material selection method for sustainable product design. **Journal of Engineering Design**, v. 26, n. 10-12, p. 365-390, 2015.
- [38] ASHBY, M. Green design in a resource constrained world – a materials perspective. In: Webseminar, 2015.
- [39] ZARANDI, M. H. F. et al. A material selection methodology and expert system for sustainable product design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 57, n. 9-12, p. 885-903, 2011.
- [40] BUCHERT, T. et al. Enabling product development engineers to select and combine methods for sustainable design. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 413-418, 2014.
- [41] ILGIN, M. A.; GUPTA, S. M. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): a review of the state of the art. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 3, p. 563-591, 2010.
- [42] SANTOS, A. VEZZOLI, C.; MORAIS JUNIOR, D. Linking lean production and design for sustainability on the issue of waste reduction. **Product : Management & Development**, v. 6, n. 2, p. 135-141, 2008.
- [43] JABBOUR, A. B. L. S. et al. Lean and green?: evidências empíricas do setor automotivo brasileiro. **Gest. Prod.**, v. 20, n.3, p. 653-665, 2013. ISSN 0104-530X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013000300011>>. Acesso em out. 2015.
- [44] JAYAL, A. D. et al. Sustainable manufacturing: modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 2, n. 3, p. 144-152, 2010.
- [45] PAMPANELLI, A. B.; FOUND, P.; BERNARDES, A. M. A lean & green model for a production cell. **Journal of cleaner production**, v. 85, p. 19-30, 2014.
- [46] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Lean manufacturing and the environment: research on advanced manufacturing systems and the environment and recommendations for leveraging better environmental performance**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/lean/environment/pdf/leanreport.pdf>>. Acesso em: abr. 2015.

- [47] FREITAS, J. R. **A formação de mecânicos de manutenção aeronáutica e a segurança de voo**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência, Tecnologia e Sociedade) – Centro de Educação e Ciências Humanas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- [48] ZAMPROGNO, C. F. **Gestão e desenvolvimento em fatores humanos na segurança do voo: estudo na manutenção aeronáutica**. 2011.162 f. Dissertação (Mestrado em Ciência, Tecnologia e Sociedade) – Centro de Educação e Ciências Humanas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- [49] HEXCEL. **HexWeb honeycomb sandwich design technology**. Available from: <[http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb\\_Sandwich\\_Design\\_Technology.pdf](http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf)>. Acesso em: out. 2015.
- [50] 3M. **3M™ scotch-weld™ epoxy adhesive DP460 off-white**. Disponível em: <[http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/GovernmentSolutions/Home/ProductInformation/ProductCatalog/~/3M-Scotch-Weld-Epoxy-Adhesive-DP460?N=5928575+5002385+4294871470&rt=d5](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/GovernmentSolutions/Home/ProductInformation/ProductCatalog/~/3M-Scotch-Weld-Epoxy-Adhesive-DP460?N=5928575+5002385+4294871470&rt=d5)>. Acesso em: ago. 2014.
- [51] LOCTITE. **The adhesive sourcebook**. Disponível em: <[http://www.henkelna.com/us/content\\_data/353011\\_LT3355\\_ASB\\_v18\\_Book\\_2014\\_LR384658.pdf](http://www.henkelna.com/us/content_data/353011_LT3355_ASB_v18_Book_2014_LR384658.pdf)>. Acesso em: dez. 2014.
- [52] HUNTSMAN. **Advanced materials - aerospace materials for production and assembly - selector guide**. Disponível em: <[http://www.huntsman.com/advanced\\_materials/Media%20Library/a\\_MCED5570E284BD76EE040EBCD2B6B7A1B/Industries\\_MCEFD19E1A181BDB8E040EBCD2B6B77C9/Aerospace%20%20%20Defense\\_MD0A897C864EA124EE040EBCD2B6B72D4/files/US%20Aerospace%20Selector%20Guide%202013.pdf](http://www.huntsman.com/advanced_materials/Media%20Library/a_MCED5570E284BD76EE040EBCD2B6B7A1B/Industries_MCEFD19E1A181BDB8E040EBCD2B6B77C9/Aerospace%20%20%20Defense_MD0A897C864EA124EE040EBCD2B6B72D4/files/US%20Aerospace%20Selector%20Guide%202013.pdf)>. Acesso em: jun. 2014.
- [53] ETA GLOBAL INC. **Aircraft inserts and studs**. Disponível em: <<http://etaglobal.thomasnet-navigator.com/item/all-categories/aircraft-inserts-and-studs/item-1005?>>. Acesso em: jan. 2012.
- [54] SPECTRA. **Interior products**. Disponível em: <<http://www.spectra-ip.com/>>. Acesso em: ago. 2014.
- [55] DUPONT. **Tedlar polyvinyl fluoride (PVF) films – general properties**. Disponível em: <[http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/membranesfilms/assets/DEC\\_Tedlar\\_GeneralProperties.pdf](http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/membranesfilms/assets/DEC_Tedlar_GeneralProperties.pdf)>. Acesso em: dez. 2014.

- [56] NASCIMENTO, G. C. **Avaliação da influência de intempéries na qualidade superficial de sistemas poliméricos utilizados em acabamento de mobiliário aeronáutico**. 2013. 246 f. Tese (Doutorado Materiais e Processos de Fabricação) – Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, São José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.
- [57] WILSONART. **Wilsonart® fire-rated laminate**. Disponível em: <<http://www.wilsonart.com/docs/default-source/wilsonart-documents/technical-information-technical-data-sheets-fire-rated-laminates.pdf?sfvrsn=2>>. Acesso em: abr. 2014.
- [58] PPG AEROSPACE. **Commercial/civil aviation – interior cabin coatings: desothane® HS cabin interior topcoats / CA 8400 series**. Disponível em: <[http://www.ppg.com/coatings/aerospace/coatings/coatingsproducts/Documents/CA8400\\_Desothane\\_HS\\_Interior\\_Cabin\\_Coating.pdf](http://www.ppg.com/coatings/aerospace/coatings/coatingsproducts/Documents/CA8400_Desothane_HS_Interior_Cabin_Coating.pdf)>. Acesso em: ago. 2014.
- [59] AEROFLOOR. **Aerofloor products**. Disponível em: <<http://www.aerofloor.com/products>>. Acesso em: dez. 2014.
- [60] LIST. **Stone flooring**. Disponível em: <<http://www.list.at/eng/Air/Innovations/Stone-Flooring>>. Acesso em: dez. 2014.
- [61] 3M. **3M™ scotch-weld™ neoprene high performance contact adhesive EC-1357**. Disponível em: <[http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/GovernmentSolutions/Home/ProductInformation/ProductCatalog/~/\\_/3M-Scotch-Weld-Neoprene-High-Performance-Contact-Adhesive-EC-1357-Pint-12-per-case?N=7577534+5928575+3294569346&rt=d](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/GovernmentSolutions/Home/ProductInformation/ProductCatalog/~/_/3M-Scotch-Weld-Neoprene-High-Performance-Contact-Adhesive-EC-1357-Pint-12-per-case?N=7577534+5928575+3294569346&rt=d)>. Acesso em: ago. 2014.
- [62] SANTOS, C. V. et al. **Materials selection for sustainable executive aircraft interiors**. Materials Research, 2015, (aceito para publicação).
- [63] GULFSTREAM. **Gulfstream brochures**. Disponível em: <<http://www.gulfstream.com/downloads/brochures.htm>>. Acesso em: dez. 2011.
- [64] PAIM, N.; SCOTTON, T. **Materiais para o setor moveleiro**. Porto Alegre: CNI/SENAI, 2007. 76 p.
- [65] BLACK, S. A. R. A. Advanced materials for aircraft interiors. **High performance composites**, v. 14, n. 6, p. 24, 2006.
- [66] EMBRAER. Lineage: sua casa longe de casa... **Revista Bandeirante**, v. 42, p. 11-13, 2011.
- [67] EDWARDS, K.; DENG, Y. M. Supporting design decision-making when applying materials in combination. **Materials and Design**, v. 28, p. 1288-1297, 2007.
- [68] FARAG, M.M. **Materials and Process Selection for Engineering Design**. 2. ed. New York: CRC Press, 2007. 432 p.

- [69] ASHBY, M. F. **Material selection in mechanical design**. 2. ed. United Kingdom: Elsevier, 1999. 502 p.
- [70] ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos - uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo: Saraiva, 2006.
- [71] GREGOLIN, J. A. R. **Notas de aula da Disciplina Prospecção Tecnológica e Inteligência Competitiva em Materiais**. São Carlos: Curso de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- [72] ROZENFELD, H. **Modelo de referência do processo de desenvolvimento de produto da fábrica integrada modelo**. Disponível em: <[http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/Modelo\\_de\\_Refer%C3%Aancia\\_FIM.html#Conceber](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/Modelo_de_Refer%C3%Aancia_FIM.html#Conceber)>. Acesso em: ago. 2011.
- [73] CSILLAG, J. M. **Análise do Valor**. 2. Ed. São Paulo: Atlas, 1986. 284 p.
- [74] MELO FILHO, L. D. R.; CHENG, L. C. QFD na garantia da qualidade do produto durante seu desenvolvimento – caso em uma empresa de materiais. **Produção**, v. 17, n. 3, p. 604-624, 2007.
- [75] MAYYAS, A. et al. Using quality function deployment and analytical hierarchy process for material selection in a body-in-white. **Materials and Design**, v. 32, p. 2771 -2782, 2011.
- [76] BRALLA, J. G. **Design for excellence**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1996. 326 p.
- [77] ZEPON, G.; ANTONIALI, A. Í. S.; BOLFARINI, C. Estudo de viabilidade da utilização de ligas de titânio de baixo módulo de elasticidade em próteses de quadril. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ÓRGÃOS ARTIFICIAIS E BIOMATERIAIS, 2012, Natal. **Anais...** Disponível em: <[www.metallum.com.br/7colaob/resumos/trabalhos.../01-308.doc](http://www.metallum.com.br/7colaob/resumos/trabalhos.../01-308.doc)>. Acesso em: out. 2015.
- [78] KARANA, E.; HEKKERT, P.; KANDACHAR, P. Material consideration in product desing: a survey on crucial caterial aspects used by product designers. **Materials and Design**, v. 29, p. 1081-1089, 2008.
- [79] ASHBY, M. F.; SHERCLIFF, H; CEBON, D. **Materials engineering, science, processing and design**. 1. ed. United Kingdom: Elsevier, 2007. 514 p.
- [80] GIUDICE, F. et al. Materials selection in the life-cycle design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice. **Materials and Design**, v. 26, p. 9-20, 2005.

- [81] KAMPE, S. L. Incorporating green engineering in materials selection and design. In: THE 2001 GREEN ENGINEERING CONFERENCE: SUSTAINABLE AND ENVIRONMENTALLY-CONSCIOUS ENGINEERING, 2001, Roanoke, Virginia. **Proceedings...** Roanoke: VirginiaTech's College of Engineering and the U.S. Environmental Protection Agency, 2001.
- [82] ASHBY, M. F. **Materials and the environment - eco-informed material choice**. 1. ed. United Kingdom: Elsevier, 2009. 385 p.
- [83] IBEH, C. C. AIMSeT: Advanced innovative materials selection techniques. In: THE 2003 AMERICAN SOCIETY FOR ENGINEERING EDUCATION ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION, SECTION 1649, 2003. **Proceedings...**American Society for Engineering Education, 2003.
- [84] LOGANATHAN, G. V. et al. Preference trade-offs in choosing domestic plumbing materials. **ASCE Pipelines Conf.**, v. 211, n. 540, p. 60-60, 2006.
- [85] SILVA, C. E et al. Aplicação do gerenciamento de riscos no processo de desenvolvimento de produtos nas empresas de autopeças. **Produção**, v. 20, n. 2, p. 200-213, 2010.
- [86] BRESKO, M. **Production preparation process (3P): lean concepts for project planning**. Disponível em: < <http://www.gpallied.com/wp-content/blogs.dir/27/files/2011/06/015.-3P-Lean-Production-Preparation.pdf>>. Acesso em: out. 2015.
- [87] MUNRO, S. **Design for assembly/ manufacturability: winning the global manufacturing war by design**. Disponível em:<[http://www.scav-csva.org/upload/publications/9941\\_Munro1998.pdf](http://www.scav-csva.org/upload/publications/9941_Munro1998.pdf) >. Acesso em: out. 2015.
- [88] SPRANG, B. **Lean design™ - driving lean efforts into product development for greater impact**. Disponível em: <[http://iienet.org/uploadedfiles/IIE/Technical\\_Resources/Archives/Lean\\_Design/Driving\\_Lean\\_Efforts\\_into\\_Product\\_Development\\_f.doc](http://iienet.org/uploadedfiles/IIE/Technical_Resources/Archives/Lean_Design/Driving_Lean_Efforts_into_Product_Development_f.doc)>. Acesso em: fev. 2011.
- [89] SIMÕES, C. L. et al. Integrating environmental and economic life cycle analysis in product development: a material selection case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 9, p. 1734-1746, 2013.
- [90] FARAG, M. M. Quantitative methods of materials substitution: application to automotive components. **Materials and Design**, v. 29, p. 374-380, 2008.
- [91] ROZENFELD, H. **Análise de valores - conceitos básicos**. Disponível em:<[http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/analise\\_de\\_valores.htm](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/analise_de_valores.htm)>. Acesso em: dez. 2010.

- [92] LAWRENCE MILLE FOUNDATION. **Carbon project plan**. Disponível em <<http://www.valuefoundation.org/>>. Acesso em: mar. 2011.
- [93] EDWARDS, K. Selecting materials for optimum use in engineering components. **Materials and Design**, v. 26, 469-473, 2005.
- [94] LANDRU, D. A.; BRÉCHET, Y. A.; SALVO, L.B. Materials and process selection - an integrated approach. **Advanced Engineering Materials**, v. 4, n. 6, p. 357-362, 2002.
- [95] MUNRO & ASSOCIATES. **Timing: do it right the first time**. Disponível em: <[http://www.leandesign.com/NL\\_Timing\\_main.html](http://www.leandesign.com/NL_Timing_main.html)>. Acesso em: mar. 2011.
- [96] WALTER, O. M. F. C.; TUBINO, D. F. Métodos de avaliação da implantação da manufatura enxuta: uma revisão da literatura e classificação. **Gestão e Produção**, v.20, n.1, p. 23-45, 2013. ISSN 0104-530X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013000100003>>. Acesso em out. 2015.
- [97] WOMACK, J. D., JONES, D. T.; ROOS, D. The machine that changed the world. New York: Rawson Associates Scribner, 1990.
- [98] WOMACK, J.; JONES, D. **Lean thinking: banish waste and create wealth in your corporation**. New York: Simon & Schuster, 1998.
- [99] RENTES, A. F. **Notas de aula da Disciplina Desenvolvimento de Sistemas de Produção Enxuta**. São Carlos: Departamento Pós Graduação em de Engenharia de Produção USP, 2007.
- [100] AIRBUS. **Lean**. Disponível em: <<http://www.airbus.com/work/why-join-airbus/training-and-development/lean/>>. Acesso em: jul. 2014.
- [101] BOEING. **Getting lean**. Disponível em: <<http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2002/august/cover.html>>. Acesso jul. 2014.
- [102] EMBRAER. **Programa de excelência empresarial P3E**. Disponível em: <<http://www.embraer.com/ptBR/pessoas/KnowPrograms/brasil/Paginas/p3e.aspx>>. Acesso em: jul. 2014.
- [103] SILVA, D. C. et al. Legacy 500 empennage assembly-design for manufacturing. **SAE Technical Paper**, 2012-01-1872, 2012. DOI:10.4271/2012-01-1872.
- [104] AL-ASHAAB, A. et al. The transformation of product development process into lean environment using set-based concurrent engineering: a case study from an aerospace industry. **Concurrent Engineering Research and Applications**, v. 21, n. 4, p. 268-285, dez. 2013.
- [105] SMITH, S. Applying lean techniques to the engineering process. **SAE Int. J. Aerosp.**, v. 1, n. 1, p. 757-769, 2009. DOI: 10.4271/2008-01-2284.
- [106] SALGADO, E. G. et al. Análise da aplicação do mapeamento do fluxo de valor na identificação de desperdícios do processo de desenvolvimento de produtos. **Gestão e Produção**, v. 16, n. 3, p. 344-356, 2009.

- [107] HERRERA, A. Design for manufacture and assembly, makes a difference among the boeing lean design initiatives. **SAE Technical Paper**, 981873, 1998. DOI:10.4271/981873.
- [108] FITZPATRICK, D.; LOONEY, M. A roadmap to greater efficiency in aerospace operations through the application of six sigma and lean manufacturing techniques. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 75, n. 3, p. 274-277, 2003.
- [109] BARBOSA, G. F.; CARVALHO, J.; FILHO, E.G.V. A proper framework for design of aircraft production system based on lean manufacturing principles focusing to automated processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 72, n. 9-12, p. 1257-1273, 2014.
- [110] BEAUREGARD, Y. A.; BHUIYAN, N. A.; THOMSON, V.B. Lean engineering systems for product development in the aerospace industry. In: ANNUAL CONFERENCE AND EXPO, II E, 2008, Vancouver.
- [111] WENZEL, H.; HAUSCHILLD, M. Z.; ALTING, A. **Environmental assessment of products: Volume 1: methodology, tools and case studies in product development**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997.
- [112] PIGOSSO, D. C. A. **Ecodesign maturity model: a framework to support companies in the selection and implementation of ecodesign practices**. 2012. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- [113] DALLARA, E.; KUSNITZ, J.; BRADLEY, M. Parametric life cycle assessment for the design of aircraft. **SAE Int. J. Aerosp.**, v. 6, n. 2, p. 736-745, 2013. DOI: 10.4271/2013-01-2277.
- [114] FILLETI, R. A. P. et al. Dynamic system for life cycle inventory and impact assessment of manufacturing processes. **Procedia CIRP**, v. 15, p. 531-536, 2014.
- [115] CESAR, F. I. G.; SIMON, A. T. Explorando os efeitos sinérgicos entre o sistema de produção lean e a estratégia da sustentabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXIV, 2014, Curitiba.
- [116] SILVA JUNIOR, J. A.; TAKEMOTO, L.; PEREIRA, M.A.C. Estudo da interação entre lean manufacturing e green manufacturing em uma indústria de reforma e recapagem de pneus. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXIV, 2014, Curitiba.
- [117] MORAES, J. I. et al. Proposta de integração dos indicadores de sustentabilidade no mapeamento do fluxo de valor em um sistema de produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXIV, 2014, Curitiba.

- [118] TORRES, A. S.; GATI, A. M. Environmental value stream mapping (EVSM) as sustainability management tool. In: PICMET - PORTLAND INTERNATIONAL CONFERENCE, 2009, Portland. **Management of Engineering & Technology**. Portland: 2009. p.1689-1698.
- [119] AZAPAGIC, A.; PERDAN, S. Indicators of sustainable development for industry: a general framework. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 78, n. B4, p. 243-261, 2000. ISSN 0957-5820.
- [120] JOUNG, C. B. et al. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. **Ecological Indicators**, v. 24, p. 148-157, 2013. ISSN 1470-160X.
- [121] SIRACUSA, G.; LA ROSA, A. D.; STERLINI, S. E. A new methodology to calculate the environmental protection index (E-p): a case study applied to a company producing composite materials. **Journal of Environmental Management**, v. 73, n. 4, p. 275-284, 2004. ISSN 0301-4797.
- [122] TSENG, M. L. Modeling sustainable production indicators with linguistic preferences. **Journal of Cleaner Production**, v. 40, p. 46-56, 2013.
- [123] YUAN, C.; ZHAI, Q.; DORNFELD, D. A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 39-42, 2012.
- [124] RUIZ-MERCADO, G. J.; SMITH, R. L.; GONZALEZ, M. A. Sustainability indicators for chemical processes: I. taxonomy. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 5, p. 2309-2328, 2012. ISSN 0888-5885.
- [125] MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis**. São Paulo: Edusp, 2002. 368 p.
- [126] AVIATION TODAY. **Embraer launches execuCare environmental program**. Aviation today, 2 jun. 2008. Disponível em: <[http://www.aviationtoday.com/regions/usa/Embraer-Launches-ExecuCare-Environmental-Program\\_22348.html#.VF7URfnF\\_Xo](http://www.aviationtoday.com/regions/usa/Embraer-Launches-ExecuCare-Environmental-Program_22348.html#.VF7URfnF_Xo)>. Acesso em: dez. 2014.
- [127] 3M. **3M™ scotch-weld™ void filling compound EC-3524 B/A off-white**. Disponível em: <[http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/GovernmentSolutions/Home/ProductInformation/ProductCatalog/~/3M-Scotch-Weld-Void-Filling-Compound-EC-3524-B-A-Off-White-1-Gallon-Kit-2-per-case?N=5](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/GovernmentSolutions/Home/ProductInformation/ProductCatalog/~/3M-Scotch-Weld-Void-Filling-Compound-EC-3524-B-A-Off-White-1-Gallon-Kit-2-per-case?N=5)>. Acesso em: ago. 2014.
- [128] CHAVES, L. I. Design for sustainability: a methodological approach for the introduction of environmental requirements in the furniture sector. **Product: Management & Development**, v. 6, n. 2, p. 167-172, 2008.

- [129] MC GILL CORPORATION. **Material safety data sheet - GILLFAB 5071/5075 – sandwich panels composed of fiberglass fabric-reinforced phenolic facing skins bonded to a nomex aramid honeycomb core.** Disponível em: <[http://www.mcgillcorp.com/public/msds/MSDS\\_115.pdf](http://www.mcgillcorp.com/public/msds/MSDS_115.pdf)>. Acesso em: jun. 2014.
- [130] SEBRAE/ESPM. **Móveis para cozinha - estudos de mercado.** Disponível em: <[http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/B9CC0B872FB3A2378325753E005E974B/\\$File/NT0003DB0A.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/B9CC0B872FB3A2378325753E005E974B/$File/NT0003DB0A.pdf)>. Acesso em: dez. 2011.
- [131] IRITANI, D. R. et al. Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: a case study in a furniture industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 308-318, 2015.
- [132] LOPES, J. **Life cycle assessment of the Airbus A330-200 aircraft.** 2010. 95 p. Dissertação (Engenharia Aeroespacial) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [133] SCELISI, L. et al. Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment. **Express Polymer Letters**, v. 5, n. 3, p. 209-217, 2011.
- [134] OLIVEUX, G.; DANDY, L. O.; LEEKE, G. A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties. **Progress in Materials Science**, v. 72, p. 61-99, 2015.
- [135] DUFLOU, J. R. et al. Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 58, n. 1, p. 9-12, 2009.
- [136] AIRBUS OPERATIONS LTD. Heitzmann, M.; Lindenberger, B.; Ng, C. **Composite material.** WO2010142774 (A1), 2010.
- [137] 3M. **Safety data sheet – 3M™ scotch-weld™ neoprene high performance contact adhesive EC-1357 grey-green.** Disponível em: <[multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSuUn\\_zu8l00x4xt9lY\\_9Nv70k17zHvu9lxtD7SSSSSS](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSuUn_zu8l00x4xt9lY_9Nv70k17zHvu9lxtD7SSSSSS)>. Acesso em: out. 2015.
- [138] HUNTSMAN. **Material safety data sheet - EPOCAST® 1622 FST A/B US - two component, flame-retardant epoxy edge filler.** Disponível em: <[https://www.huntsmanservice.com/portal/page/portal/EBUSINESS\\_GENERAL\\_PGR/CHEMMATE\\_JSP\\_PG](https://www.huntsmanservice.com/portal/page/portal/EBUSINESS_GENERAL_PGR/CHEMMATE_JSP_PG)>. Acesso em: jun. 2014.
- [139] PPG AEROSPACE PRC-DESOTO. **Material safety data sheet – CA 8400B activator component.** Disponível em: <[https://buyat.ppg.com/ehsdocumentmanagerpublic/pdf\\_main.aspx?StreamId=52be5a889a4f31750000&id=52be5a889a5032bd0001](https://buyat.ppg.com/ehsdocumentmanagerpublic/pdf_main.aspx?StreamId=52be5a889a4f31750000&id=52be5a889a5032bd0001)>. Acesso em: set. 2014.

- [140] 3M. **Material safety data sheet –3M(TM) scotch-weld(TM) epoxy adhesive DP-460, off-white**. Disponível em: <[http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUNY\\_SP8\\_ZevUqevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=DP-460.pdf](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUNY_SP8_ZevUqevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=DP-460.pdf)>. Acesso em: set. 2014.
- [141] WILSONART. **Wilsonart® cabinet liner sheets**. Disponível em: <<http://www.wilsonart.com/docs/default-source/wilsonart-documents/technical-information-technical-data-sheets-cabinet-liner-sheet.pdf?sfvrsn=18>>. Acesso em: abr. 2014.
- [142] LOHNER, H. et al. Eco-efficient materials for aircraft application. **SAE Technical Paper**, 2011-01-2742, 2011. DOI:10.4271/2011-01-2742.
- [143] ALESSANDRO, J. ; ODA, T. Volatile organic compound (VOC) reduction within the interior cabin. **SAE Int. J. Mater. Manf.**, v. 2, n. 1, p. 18-22, 2009. DOI:10.4271/2009-01-0021.
- [144] DOUDRICH, G. et al. Defining Environmental indicators at detail design stage as part of an ecodesign strategy. **SAE Int. J. Aerosp.**, v. 6, n. 2, p. 727-735, 2013. DOI:10.4271/2013-01-2276.
- [145] 3M INNOVATIVE PROPERTIES CO. Dams, R. J.; Dams, J. **Process for preparation of polymeric foam using fluorinated ketones as blowing agents**. WO0024814 (A1), 1999.
- [146] HUIZHOU CHANGYI NEW MATERIALS CO LTD. Du, C.; Lin, H. **Halogen-free flame retardant for PA66 and environment-friendly flame-retardant PA66 material prepared thereby**. CN104119676 (A), 2014.
- [147] TOYOBO CO LTD. Abe, K. et al. **Decorative sheet for ornamentation**. JP2004106411 (A), 2002.
- [148] CHEMTEALL GMBH. Shimakura, T. et al. **Method for pretreating and subsequently coating metallic surfaces with a paint-type coating prior to forming and use of substrates coated in this way**. EP1330499 (A2), 2001.
- [149] MITSUBISHI CHEM.; SHOWA I. N.K.; KOGYOSHO, K. K.; DAINIPPON PRINTING CO LTD. Soejima, Y. et al. **Decorative sheet, water base resin for coloring decorative sheet, and water base coating liquid for coloring decorative sheet**. JP2008023752 (A), 2006.
- [150] INT PARK CREATIVITY; CUERO RENGIFO, R.; MELO RODRIGUEZ, G. Cuero, R. R.; Melo, R. G. **Polyurethane biofoams derived from natural products and methods of making and using thereof**. WO2015017847 (A1), 2014.
- [151] TORAY IND INC. Mitsuishi, T.; Koide, A.; Matsuzaki, Y. **Leather-like sheet-shaped material and method for producing the same**. JP2012136800 (A), 2010.

- [152] KORWIN-EDSON M L. Korwin-Edson, M. L. et al. **Room temperature crosslinked foam**. US2008161432 (A1), 2007.
- [153] HANIL E HWA CO LTD. Kim, K.; Ji, S. **Natural fiber polymer composite and eco-friendly lightweight base material for automotive interior**. EP2881249 (A1), 2014.
- [154] ACETYLATED FIBRES LTD. Chandler, B.; Oliver, P. C.; Dowdall, C. **Treatment of a natural cellulosic fibre with an anhydride**. WO2010112896-A1, 2010.
- [155] BOETTCHER, A.; PILATO, L. The value of phenolic resins for advanced fiber reinforced systems: a short review. **Sampe Journal**, v. 51, n. 2, p. 38-40, 2015.
- [156] BREMER, C. Bremer, C. **Sandwich structure for use in booth and store constructions, has core layer arranged between two surface layers, where one of core and surface layers is formed from material, which consists of polylactide or polylactic acid or corn starch**. DE102008058534 (A1), 2008.
- [157] BOEING CO. Gonzalez-Garcia, A. et al. **Fire resistant sustainable aircraft interior panels**. US2015190987 (A1), 2014.
- [158] HEXCEL CORP. Hookham, N.; Lee, A. **Forming process for cellulose paper based honeycomb structures**. EP1195241 (A2), 2001.
- [159] YOKOHAMA RUBBER CO LTD. Taguchi, Y.; Kobayashi, T; Hirose, A. **Aircraft interior panel material and manufacturing method therefor**. WO2015050239 (A1), 2014.
- [160] HEXCEL CORP. Heitkamp, R. R. et al. **Environmentally safer process of manufacturing honeycomb products for use in composite materials using a water-based phenolic thermosetting resin and the products made thereby**. US5711992 (A), 1995.
- [161] MITSUBISHI RAYON CO. Okazaki, S.; Sumino, Y.; Suemura, K. **Method for manufacturing photocurable sheet**. JP2003313334 (A), 2002.
- [162] GOLDEN, R.R. Low-Emission Technologies: A Path to Greener Industry. **Radtech Report**, maio/jun. 2005. Disponível em: <<http://72.52.184.8/~radtecho/pdfs/lowemissiontechnologies.pdf>>. Acesso em jul. 2014.
- [163] KELLY, M. The Economics of Sustainable UV Technology. **Radtech Report**, abr./maio/jun. 2009. Disponível em: <<http://72.52.184.8/~radtecho/pdfs/EconomicsSustainableUVTechnology.pdf>>. Acesso em: jul. 2014.
- [164] RADTECH SOUTH AMERICA. **Curso técnico básico e especialidades da cura por radiação ultra-violeta (UV) e feixe de elétrons (EB)**, 2010, São Paulo.

- [165] EUROPEAN COMMISSION. **Friendly aircraft cabin environment (FACE)**. Disponível em: <[http://researchprojects.kth.se/index.php/kb\\_1/io\\_8679/io.html](http://researchprojects.kth.se/index.php/kb_1/io_8679/io.html)>. Acesso em: out. 2015.



## APÊNDICE A

### Tempos e análise de agregação de valor para os processos e etapas de fabricação do gabinete modelo.

Processo de fabricação		Etapas de fabricação		Tempo (h)		
				A*	N*	D*
1	Fabricação de peças em painel sanduíche	1.1	Programação para usinagem CNC (agrupamento de peças no painel)		2	
		1.2	Pré-corte do contorno das peças para preenchimento de bordas com resina.		2,4	
		1.3	Preenchimento dos contornos das peças nas placas com resina.		1,5	
		1.4	Cura da resina.		12	
		1.5	Remoção do excesso de resina curada da face do painel sanduíche.			4,6
		1.6	Usinagem para destacamento das peças do painel e furação para insertos.	1,6		
2	Instalação de insertos	2.1	Limpeza e posicionamento de insertos.	2		
		2.2	Aplicação de adesivo.	1		
		2.3	Cura do adesivo.		4	
		2.4	Remoção do excesso de adesivo.			3,1
3	Pré-montagem	3.1	Pré-montagem do móvel utilizando grampos, gabaritos e adesivos temporários, com ajuste dimensional das peças por lixamento ou aplicação adicional de resina.			5,1
		3.2	Montagem definitiva da estrutura do móvel pelas técnicas de colagem de ranhura e lingueta, inserção de pinos com adesivo e corte/dobra e colagem do painel sanduíche.	3,4		
		3.3	Cura dos adesivos.		6	
		3.4	Montagem das portas e gaveta (partes móveis) na estrutura do móvel e ajustes (implicando em lixamento dos painéis e aplicação de resinas para corrigir folgas e degraus).			5,5
		3.5	Desmontagem das partes móveis.			0,5
4	Colagem do acabamento (laminados e encabeçamentos em madeira)	4.1	Modelagem dos laminados decorativos na estrutura e partes móveis do móvel.		3,5	
		4.2	Aplicação de adesivo e colagem dos laminados com aplicação manual de pressão.	3,5		
		4.3	Recorte e lixamento do excesso de laminado das bordas das peças.			1,5
		4.4	Modelagem do encabeçamento de madeira na borda das peças.		0,5	
		4.5	Aplicação do adesivo e colagem dos encabeçamentos.	0,5		
		4.6	Cura do adesivo dos encabeçamentos.		4	
		4.7	Lixamento do excesso de encabeçamentos e ajuste às peças.			0,7
5	Pintura e aplicação de verniz	5.1	<b>Envernizamento dos laminados e encabeçamentos de madeira</b>			
		5.1.1	Isolamento das superfícies que não receberão verniz com papel e fita adesiva.		0,5	
		5.1.2	Lixamento das superfícies em madeira.		0,8	
		5.1.3	Aplicação da camada de isolante.	0,5		
		5.1.4	Cura da camada de isolante.		2	
		5.1.5	Lixamento da camada de isolante.		0,8	
		5.1.6	Aplicação de verniz selador (6 vezes).	7		
		5.1.7	Cura das camadas de selador (6 vezes).		120	
		5.1.8	Lixamento das camadas de selador (6 vezes).		4,5	
		5.1.9	Aplicação de verniz de acabamento.	1,2		
		5.1.10	Cura do verniz de acabamento.		18	
		5.1.11	Remoção do isolamento das superfícies não envernizadas.		0,5	
		5.2	<b>Pintura do painel sanduíche (parte interna do móvel e parte externa da gaveta).</b>			
		5.2.1	Isolamento das superfícies do móvel que não receberão tinta com papel e fita adesiva.		0,5	
		5.2.2	Lixamento do painel sanduíche e correção de imperfeições com resina.		2,5	
		5.2.3	Aplicação de tinta base (2 vezes)	2		
		5.2.4	Cura da tinta base (2 vezes)		6	
		5.2.5	Lixamento da tinta base (2vezes)		3	
5.2.6	Aplicação da tinta de acabamento	1				
5.2.7	Cura da tinta de acabamento		3			
5.2.8	Remoção do isolamento das superfícies que não receberam pintura		0,5			

		<b>5.3</b>	<b>Polimento das superfícies envernizadas.</b>		5	
<b>6</b>	<b>Montagem final</b>	6.1	Instalação das partes móveis (portas , gaveta e tampo estofado) fixando-as através de insertos e dobradiças.	1,5		
		6.2	Ajustes através de mecanismos de regulagem finos dos dispositivos de fixação.			4
<b>7</b>	<b>Inspeção e embalagem</b>	7.1	Inspeção unitária do aspecto visual e de folgas e degraus na montagem.			1
		7.2	Embalagem do móvel.		0,5	
<b>8</b>	<b>Fabricação do estofado</b>	8.1	Colagem da espuma no painel sanduíche com adesivo de contato e ajustes.	0,5		
		8.2	Recorte e colagem do tecido bloqueador de chama.	0,5		
		8.3	Modelagem e costura do couro.		0,7	
		8.4	Vestir e colar capa de couro com adesivo de contato.	0,4		
<b>9</b>	<b>Fabricação de encabeçamentos em madeira</b>	9.1	Seleção da madeira: coloração, isenta de defeitos naturais destoantes.			0,7
		9.2	Corte e planificação de pranchas com serra, desempenadeira e desengrossadeira.		1	
		9.3	Fabricação dos encabeçamentos utilizando tupia e outras máquinas específicas.	2,5		
<b>Tempo total das atividades (horas)</b>				<b>29</b>	<b>206</b>	<b>27</b>
<b>Tempo total das atividades (%)</b>				<b>11</b>	<b>79</b>	<b>10</b>

\***A** = Atividades que agregam valor; **N**= Atividades necessárias; **D**=desperdício