UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DIOGO APARECIDO LOPES SILVA

GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS POR MEIO DA
AVALIAÇÃO E DO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE
PROCESSOS DE MANUFATURA: PROCEDIMENTO E
ESTUDOS DE CASO

São Carlos

2016

DIOGO APARECIDO LOPES SILVA

**GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS POR MEIO DA
AVALIAÇÃO E DO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE
PROCESSOS DE MANUFATURA: PROCEDIMENTO E
ESTUDOS DE CASO**

Texto apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPG-SEP da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Processos e Gestão de Operações.

Orientador: Aldo Roberto Ometto

Coorientador: Eraldo Jannone da Silva

São Carlos

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Catalogação da Publicação
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

L591g Lopes Silva, Diogo Aparecido
Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da
avaliação e do monitoramento ambiental de processos de
manufatura: procedimento e estudos de caso / Diogo
Aparecido Lopes Silva; orientador Aldo Roberto Ometto;
coorientador Eraldo Jannone da Silva. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Área de Concentração em
Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Gestão do ciclo de vida. 2. Manufatura
sustentável. 3. Manufatura verde. 4. Monitoramento
ambiental. 5. Processos de manufatura. 6. Painéis de
madeira. 7. Válvulas automotivas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DIOGO APARECIDO LOPES SILVA**.

Título da tese: "Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e o monitoramento ambiental de processos de manufatura: procedimento e estudos de caso".

Data da defesa: 16/06/2016.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Aldo Roberto Ometto**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Xavier Gabarrell Durany**
(Universidade Autônomo de Barcelona/UAB)

Prof. Titular **Reginaldo Teixeira Coelho**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **João Fernando Gomes de Oliveira**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Jefferson de Oliveira Gomes**
(Instituto Tecnológico de Aeronáutica/ITA)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Profa. Associada **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Aos meus pais, José Inácio e Maria Helena, pelo amor e educação
dedicado à minha formação como ser humano.
Meus primeiros professores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre me guiou nas minhas decisões e pela família que me concedeu.

Aos meus pais **José Inácio Rodrigues da Silva** e **Maria Helena de Souza Lopes Silva**, que me geraram e criaram da melhor forma que puderam. Me orgulho de ser filho de vocês!

À todos os meus familiares, especialmente à minha irmã Valéria Lopes da Silva.

Ao orientador de doutorado Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto.

Ao co-orientador de doutorado Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva.

À Banca Examinadora desta tese de doutorado, pelas valiosas contribuições realizadas.

Ao Prof. Titular Xavier Gabarrell Durany, da Universidade Autônoma de Barcelona, Espanha, Grupo de Pesquisa SosteniPra, pelas contribuições de pesquisa durante o intercâmbio realizado.

Ao Prof. Titular Joost Duflou, e ao pesquisador Dr. Karel Kellens, da Universidade Católica de Lovaina (KU Leuven), Bélgica, Centro para Gestão Industrial / Tráfego e Infraestrutura, pelas contribuições realizadas para a conclusão desta tese.

Ao Prof. Dr. David A. Dornfeld, da Universidade da Califórnia, Estados Unidos (*in memoriam*).

Ao amigo e orientador durante o mestrado no LaMEM-EESC-USP, Prof. Titular Francisco Antonio Rocco Lahr, por ser um exemplo de profissionalismo e de ser humano.

À Prof. Dr. Maria Angélica Martins Costa, orientadora de Iniciação Científica durante a graduação na UNESP de Itapeva/SP, por ter me incentivado ao ingresso na vida acadêmica.

Às empresas que colaboraram com o fornecimento aberto dos dados que sustentam esta pesquisa, tendo sido respeitado o trato de confidencialidade no tocante às suas identidades.

À todos os colegas e amigos, coautores dos 22 artigos científicos, 2 livros e 6 capítulos de livro publicados em periódicos nacionais e internacionais durante o período de doutorado.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa EGCV – Engenharia e Gestão do Ciclo de Vida de Produto, incluindo os alunos, pesquisadores, e professores.

Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, incluindo os alunos, pesquisadores, professores e funcionários.

Aos demais professores, amigos e colegas que tive durante toda a vida até aqui.

À CAPES, pela bolsa concedida no período de Agosto/2012 à Junho/2013.

À CAPES/DGU, processo 9331/13-1, pela bolsa de intercâmbio concedida no período de Novembro/2013 à Abril/2014.

À FAPESP, processo 2013/06736-9, pela bolsa concedida no período de Agosto/2013 à Julho/2016.

...
When you want more than you have
You think you need
And when you think more than you want
Your thoughts begin to bleed
I think I need to find a bigger place
Because when you have more than you think
You need more space

Society, you're a crazy breed
Hope you're not lonely without me
Society, crazy indeed
Hope you're not lonely without me

(Society – Eddie Vedder)

RESUMO

SILVA, D. A. L. (2016). **Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e do monitoramento ambiental de processos de manufatura: procedimento e estudos de caso.** 317f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O conceito de *Green Manufacturing (GM)* se remete à manufatura ambientalmente sustentável de produtos. As pesquisas envolvendo *GM* tem se intensificado nos últimos anos, com destaque para a utilização da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Contudo, a adoção prática da *GM* pelas indústrias de manufatura ainda esbarra em diversas limitações. Entre as barreiras gerenciais, diversos autores destacam que o uso isolado da ACV e de outras técnicas e ferramentas muitas vezes se mostra limitado em prol de uma adequada promoção da *GM* no ambiente fabril. Assim, visando superar este tipo de barreira, a presente tese de doutorado foi proposta. Seu objetivo foi o de desenvolver e testar um novo procedimento de *GM* para a avaliação e o monitoramento ambiental de processos de manufatura. Para isso, uma pesquisa bibliográfica foi realizada, onde ao todo 333 artigos foram selecionados e analisados, e diversas limitações foram identificadas nos mesmos, as quais serviram de base para o desenvolvimento do novo procedimento de *GM* desta tese. Como resultado, o procedimento desenvolvido foi organizado em dez etapas distintas, todas distribuídas em três macroetapas: pré-avaliação, avaliação e monitoramento ambiental, e pós-avaliação. Sobre o teste prático do procedimento, foram realizados dois estudos de caso: 1) uma empresa fabricante de painéis de madeira aglomerada para uso na produção de móveis residenciais e comerciais; e 2) uma empresa produtora de válvulas para uso em motores de veículos automotivos. O estudo 1) mostrou que o processo de prensagem à quente dos painéis foi destaque, especialmente devido ao consumo de eletricidade e as emissões ao ar de formaldeído livre geradas pelo processo. A prensagem à quente apresentou potencial para afetar não somente os impactos do processo de fabricação, mas também os impactos a montante e a jusante da manufatura. Já no estudo 2), foi destaque o processo de retificação *centerless* da haste das válvulas, devido ao consumo de eletricidade e de fluido de corte na retificação. O processo de retificação das válvulas não se mostrou capaz de influenciar significativamente os impactos de outras etapas do ciclo de vida do produto (e.g., uso, pós-uso). Finalmente, a partir dos resultados do seu teste prático, três versões simplificadas foram propostas para o procedimento de *GM* originalmente desenvolvido. Tais versões simplificadas se mostraram vantajosas, pois permitem uma melhor aplicabilidade do procedimento de *GM* no ambiente fabril.

Palavras-chave: Gestão do ciclo de vida. Manufatura sustentável. Manufatura verde. Monitoramento ambiental. Processos de manufatura. Painel de madeira. Válvula automotiva.

ABSTRACT

SILVA, D. A. L. (2016). **Life cycle management of products through the evaluation and monitoring of manufacturing processes: methodological framework and case studies**. 317f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Green manufacturing (GM) is the environmental benign manufacturing of products with a minimal negative impact on the natural environment. Research studies on GM have been increased in the last years with particular focus on the application of Life Cycle Assessment (LCA). However, the manufacturing industry still faces some barriers and challenges that hinder the application of green manufacturing in practice. Regarding to managerial barriers, many authors highlight that the isolated use of LCA and other tools/techniques are limited in view of supporting the promotion of an effective implementation of GM at the shop floor area. Thus, this thesis was proposed to overcome part of such gaps. The present study was aimed at developing and testing a new GM methodological framework to environmentally evaluate and monitor manufacturing processes. For this, the GM methodological framework was based on a bibliographical research, where 333 articles were found and systematically analyzed. As result, the GM methodological framework was organized into ten different steps, and three main phases: pre-assessment, environmental assessment and monitoring, and post-assessment. Concerning the practical testing of the GM methodological framework, two case studies were carried out: 1) the production of medium density particleboards for consumption by the residential and commercial wood furniture sector; and 2) the production of exhaust valves for using by automotive vehicles. Case study 1) highlighted the hot pressing process of wood-based panels, due to the consumption of electricity and the local airborne emissions of free formaldehyde. The hot pressing process showed potential to affect not only into the manufacturing environmental impacts, but also into the upstream and downstream life cycle stages. Case study 2) pointed out the centerless grinding machining of the stem of automotive valves, due to the electricity and cutting fluid consumption. However, the grinding machining process was not effective to influence into the environmental impacts of other product's life cycle stages (e.g., use, post-use). Based on the case studies results, it was proposed three simplified versions of the original GM methodological framework in order to improve its applicability into manufacturing industries.

Keywords: Life cycle management. Sustainable manufacturing. Green manufacturing. Environmental monitoring. Manufacturing processes. Wood-based panel. Exhaust automotive valve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura teórico-prática desta pesquisa.....	36
Figura 2 – Estrutura setorial do mercado de exportações no mundo por região em 2006	41
Figura 3 – Relação entre os principais elementos da Crise Ambiental	42
Figura 4 – Demanda mundial no consumo de cinco tipos de recursos materiais chave na indústria de manufatura	44
Figura 5 – Demanda mundial por água por região e para diferentes usos.....	45
Figura 6 – Contribuição relativa de grupos de materiais para diferentes categorias de impacto ambiental	46
Figura 7 – Consumo mundial de energia entre 1971 e 2010, em milhões de toneladas de óleo equivalente (Mtoe).....	47
Figura 8 – Consumo de energia nos Estados Unidos por setor entre 1980 e 2040, em quadrilhões de Btu.....	48
Figura 9 – Consumo de energia elétrica no Brasil por setor entre 2009 e 2011, em GWh	50
Figura 10 – Geração de resíduos sólidos nos Estados Unidos em diferentes setores.....	56
Figura 11 – Relação entre manufatura e o meio ambiente numa visão de CVP	57
Figura 12 – Relação entre parâmetros de processo de manufatura e os RTQP.....	59
Figura 13 – Etapas do ciclo de vida de um produto	60
Figura 14 – Fases de uma ACV	63
Figura 15 – Exemplo de conjunto de processos elementares que compõem um sistema de produto.....	65
Figura 16 – Procedimentos simplificados para o ICV.....	72
Figura 17 – Elementos mandatórios e opcionais que constituem a fase de AICV	75
Figura 18 – Estratégias de gestão ambiental	79
Figura 19 – Evolução da visão de <i>GM</i> conforme as diferentes estratégias de gestão ambiental	81
Figura 20 – Foco e etapas de aplicação da P+L e da ACV	82
Figura 21 – Evolução das estratégias de manufatura.....	85
Figura 22 – Evolutivo da produção científica em <i>GM</i>	89
Figura 23 – Representação esquemática das fases de desenvolvimento da pesquisa bibliográfica	93
Figura 24 – Representação esquemática das etapas para a execução dos estudos de caso	97
Figura 25 – Visão geral das fontes de dados para os estudos de caso 1 e 2	99
Figura 26 – Visão geral da prensa hidráulica estudada	101
Figura 27 – Insumos utilizados na produção dos painéis aglomerados.....	104

Figura 28 – Alicate amperímetro e amostragem do consumo de eletricidade na prensa hidráulica. 1) alicate amperímetro; 2) detalhe da amostragem da corrente elétrica em um dos cabos de alimentação da prensa; 3) visão geral da prensa hidráulica e do processo de amostragem da corrente elétrica.	105
Figura 29 – Resumo dos ensaios físico-mecânicos realizados para os painéis aglomerados.	107
Figura 30 – Visão geral da retificadora <i>centerless</i> estudada.....	108
Figura 31 – Elementos básicos do processo de retificação <i>centerless</i>	110
Figura 32 – Sistema de monitoramento do consumo de eletricidade no processo de retificação <i>centerless</i> . 1) sistema completo instalado; 2) visão geral do analisador digital portátil; 3) detalhe das sondas de amostragem de corrente elétrica.	112
Figura 33 – Resumo dos ensaios físico-mecânicos realizados para as válvulas automotivas.	113
Figura 34 – Macroetapas do procedimento proposto.....	129
Figura 35 – Etapas para aplicação do procedimento proposto.....	130
Figura 36 – Exemplo de diagrama de fluxo de processo na etapa de manufatura.....	133
Figura 37 – Diagrama de fluxo de processo da etapa de manufatura e relação entre os fluxos diretos e indiretos	136
Figura 38 – Detalhamento das atividades da macroetapa de <i>pré-avaliação</i> no procedimento de <i>GM</i> desenvolvido	140
Figura 39 – Exemplo de limites de fronteira de um processo elementar.....	141
Figura 40 – Exemplo de diagrama de relações para o mapeamento dos materiais e componentes utilizados na construção de maquinário industrial	142
Figura 41 – Detalhamento das atividades da macroetapa de <i>avaliação e monitoramento ambiental</i> no procedimento de <i>GM</i> desenvolvido	159
Figura 42 – Exemplo de diagrama de relações dos impactos potenciais da etapa de manufatura frente ao CVP Fonte: elaborado pelo autor.....	160
Figura 43 – Exemplo de uso das ferramentas gráfico de dispersão e análise de sensibilidade	161
Figura 44 – Detalhamento das atividades da macroetapa de <i>pós-avaliação</i> no procedimento de <i>GM</i> desenvolvido	165
Figura 45 – Visão geral do painel aglomerado e de algumas de suas aplicações na indústria moveleira.....	166
Figura 46 – Sistema de produto para o estudo de caso 1	168
Figura 47 – Diagrama de fluxo de processo da etapa de manufatura – estudo de caso 1	169
Figura 48 – Operações de manufatura agregadas no processo de <i>geração de partículas</i>	170

Figura 49 – Operações de manufatura agregadas no processo de <i>secagem e classificação de partículas</i>	171
Figura 50 – Operações de manufatura agregadas no processo de <i>encolagem e formação do colchão</i>	172
Figura 51 – Operações de manufatura agregadas no processo de <i>prensagem à quente</i>	173
Figura 52 – Operações de manufatura agregadas no processo de <i>acabamento e embalagem</i> ...	173
Figura 53 – Resultados do AICV para o estudo de caso 1	179
Figura 54 – Resultados do AICV por processo elementar da etapa de manufatura do painel aglomerado	180
Figura 55 – Resultados do AICV por processo elementar da etapa de manufatura do painel aglomerado – impactos diretos e indiretos	180
Figura 56 – Limites de fronteira do processo de prensagem à quente	183
Figura 57 – Diagrama de relações dos materiais e componentes utilizados na construção da prensa hidráulica	184
Figura 58 – Mapeamento da potência consumida em função do tempo de experimento – processo de prensagem à quente, 4,0 Mpa e 160,0°C.....	186
Figura 59 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PTHC – estudo de caso 1.	189
Figura 60 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PAG – estudo de caso 1.	190
Figura 61 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PFFO – estudo de caso 1.	191
Figura 62 – Gráficos de interação entre os fatores Pressão e Temperatura.....	193
Figura 63 – Análise de <i>hotspots</i> do processo de prensagem à quente – PTHC (CTUh)	195
Figura 64 – Análise de <i>hotspots</i> do processo de prensagem à quente, parte 1 – PAG (kg CO ₂ -eq.).....	196
Figura 65 – Análise de <i>hotspots</i> do processo de prensagem à quente, parte 2 – PAG (kg CO ₂ -eq.).....	197
Figura 66 – Análise de <i>hotspots</i> do processo de prensagem à quente – PFFO (kg NMVOC).....	198
Figura 67 – Análise de cenários para redução dos <i>hotspots</i> da prensagem à quente – PAG (kg CO ₂ -eq.).....	200
Figura 68 – Visão geral da aplicação de válvulas de motor na indústria automotiva	203
Figura 69 – Visão geral das características construtivas de uma válvula de motor	204
Figura 70 – Sistema de produto para o estudo de caso 2.....	206
Figura 71 – Diagrama de fluxo de processo da etapa de manufatura – estudo de caso 2.....	207
Figura 72 – Operações de manufatura agregadas no <i>processamento de tarugos</i>	208

Figura 73 – Operações de manufatura agregadas no <i>processamento da haste da válvula</i>	209
Figura 74 – Operações de manufatura agregadas no <i>processamento da cabeça da válvula</i>	210
Figura 75 – Operações de manufatura agregadas no processo de <i>acabamento e embalagem</i>	210
Figura 76 – Resultados do AICV para o estudo de caso 2.....	215
Figura 77 – Resultados da AICV por processo elementar da etapa de manufatura das válvulas automotivas	216
Figura 78 – Limites de fronteira do processo de retificação <i>centerless</i>	219
Figura 79 – Diagrama de relações dos materiais e componentes utilizados na construção da retificadora	221
Figura 80 – Mapeamento da potência consumida em função do tempo de experimento – processo de retificação <i>centerless</i> , 4 passes, 25,0 l/min, 1,6 cm/s	224
Figura 81 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PAG – estudo de caso 2.....	228
Figura 82 – Análise de <i>hotspots</i> do processo de retificação <i>centerless</i> – PAG (kg CO ₂ -eq.).....	231
Figura 83 – Análise de <i>hotspots</i> do processo de retificação <i>centerless</i> – PTHC (CTUh)	232
Figura 84 – Análise de cenários para redução dos <i>hotspots</i> da retificação <i>centerless</i> – PAG (kg CO ₂ -eq.)	233
Figura 85 – Objetivos principal e secundários para utilização do procedimento de <i>GM</i> desenvolvido	236
Figura 86 – Atividades simplificadas no procedimento de <i>GM</i> para o objetivo: <i>melhorar processos de manufatura específicos</i>	237
Figura 87 – Atividades simplificadas no procedimento de <i>GM</i> para o objetivo: <i>selecionar indicadores de desempenho ambiental</i>	239

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Exemplos de função, UF e de FR em estudos de ACV	67
Quadro 2– Exemplos de função, UF e de FR para estudos de ACV com foco em processos de manufatura	68
Quadro 3– Principais bancos de dados para apoio a ACV	74
Quadro 4 – Principais métodos de AICV por categoria de impacto ambiental.....	76
Quadro 5 – Diferentes definições de <i>GM</i> e de suas correlatas	84
Quadro 6 – Lista de métodos, modelos, metodologias, <i>frameworks</i> , técnicas e ferramentas de <i>GM</i>	95
Quadro 7– Resumo dos estudos de caso selecionados nesta tese	98
Quadro 8– Parâmetros de processo estudados no processo de prensagem à quente	103
Quadro 9– Resumo das principais características das matérias primas: madeira e resina urea-formaldeído.....	103
Quadro 10– Parâmetros de processo estudados no processo de retificação <i>centerless</i>	111
Quadro 11 – Lista de proposições teóricas – abrangência e objetivo.....	118
Quadro 12 – Lista de proposições teóricas de <i>GM</i> – escopo: relação com os aspectos e impactos ambientais.....	122
Quadro 13 – Lista de proposições teóricas de <i>GM</i> – escopo: etapas de aplicação.....	124
Quadro 14 – Exemplo de uso da matriz priorização de processos para a <i>pré-avaliação</i>	139
Quadro 15 – Modos de operação existentes em processos de manufatura.....	143
Quadro 16 – Exemplo de matriz de relacionamentos para a correlação entre aspectos ambientais, subunidades e modos de operação.....	144
Quadro 17 – Exemplo de folha para a coleta de dados sobre os parâmetros de processo e os RTQP.....	145
Quadro 18 – Exemplo de folha para a definição e organização das CEx.....	146
Quadro 19 – Exemplo de matriz de monitoramento ambiental de processo de manufatura para “n” condições experimentais.....	148
Quadro 20 – Exemplo de matriz de relacionamentos para a correlação entre RTQP e as etapas do CVP a jusante da manufatura para “n” condições experimentais	154
Quadro 21 – Exemplo de matriz de priorização para a seleção da melhor condição experimental na macroetapa de <i>avaliação e monitoramento</i>	158
Quadro 22 – Exemplo de lista de <i>hotspots</i> ambientais	162
Quadro 23 – Exemplo de plano de continuidade para a macroetapa de <i>pós-avaliação</i>	164
Quadro 24 – Resultados da matriz de priorização do produto de interesse para o estudo de caso 1	167
Quadro 25 – Produto, função, UF e FR do estudo de caso 1	167

Quadro 26 – Fonte de dados para os fluxos indiretos de inventário – estudo de caso 1.....	176
Quadro 27 – Matriz de priorização de processos para o estudo de caso 1.....	182
Quadro 28 – Matriz de Relacionamentos para o estudo de caso 1: aspectos ambientais, subunidades e modos de operação	184
Quadro 29 – Fonte de dados para os fluxos indiretos dos materiais e componentes da prensa hidráulica.....	185
Quadro 30 – Condições experimentais estabelecidas para o monitoramento ambiental do processo de prensagem à quente – estudo de caso 1	185
Quadro 31 – Síntese das melhores condições experimentais por categoria de impacto – estudo de caso 1.....	194
Quadro 32 – Lista de <i>Hotspots</i> ambientais – estudo de caso 1	199
Quadro 33 – Plano de Continuidade para o Estudo de Caso 1	202
Quadro 34 – Resultado da matriz para seleção do produto de interesse para o estudo de caso 2..	205
Quadro 35 – Produto, função, UF e FR do estudo de caso 2	206
Quadro 36 – Fontes de dados para os fluxos indiretos de inventário – estudo de caso 2	212
Quadro 37 – Distâncias de transporte para as matérias primas e insumos – estudo de caso 2	213
Quadro 38 – Matriz de priorização de processos para o estudo de caso 2.....	217
Quadro 39 – Matriz de relacionamentos para o estudo de caso 2: aspectos ambientais, subunidades e modos de operação	220
Quadro 40 – Fonte de dados para os fluxos indiretos dos materiais e componentes utilizados na construção da retificadora <i>centerless</i>	221
Quadro 41 – Condições experimentais estabelecidas para o monitoramento ambiental do processo de retificação <i>centerless</i> – estudo de caso 2.....	222
Quadro 42 – Lista de <i>Hotspots</i> ambientais – estudo de caso 2	233
Quadro 43– Protocolo de coleta de dados utilizado nesta tese	265
Quadro 44 – Exemplo de matriz para seleção do produto de interesse	269
Quadro 45 – Exemplo de lista para coleta de dados referentes aos modos de transporte utilizados	271
Quadro 46 – Exemplo de lista para coleta de dados referentes à influência dos RTQP sobre os impactos a jusante no CVP	272
Quadro 47 – Exemplo de lista para coleta de dados referentes à influência dos processos elementares da etapa de manufatura sobre os RTQP	273
Quadro 48 – Influência dos RTQP sobre os impactos a jusante no CVP – estudo de caso 1	274
Quadro 49 – Influência do processo <i>geração de partículas</i> sobre os RTQP – propriedades físicas	275

Quadro 50 – Influência do processo <i>secagem e classificação de partículas</i> sobre os RTQP – propriedades físicas	275
Quadro 51 – Influência do processo <i>encolagem e formação do colchão</i> sobre os RTQP – propriedades físicas	276
Quadro 52 – Influência do processo <i>prensagem à quente</i> sobre os RTQP – propriedades físicas	276
Quadro 53 – Influência do processo <i>acabamento e embalagem</i> sobre os RTQP – propriedades físicas	276
Quadro 54 – Influência dos RTQP sobre os impactos a jusante do CVP – estudo de caso 2	277
Quadro 55 – Influência do <i>processamento de tarugos</i> sobre os RTQP – propriedades físicas.....	278
Quadro 56 – Influência do <i>processamento de tarugos</i> sobre os RTQP – propriedades mecânicas	278
Quadro 57 – Influência do <i>processamento da haste</i> sobre os RTQP – propriedades físicas	278
Quadro 58 – Influência do <i>processamento da haste</i> sobre os RTQP – propriedades mecânicas..	278
Quadro 59 – Influência do <i>processamento da cabeça</i> sobre os RTQP – propriedades físicas	279
Quadro 60 – Influência do <i>processamento da cabeça</i> sobre os RTQP – propriedades mecânicas	279
Quadro 61 – Influência do <i>acabamento e embalagem</i> sobre os RTQP – propriedades físicas..	279
Quadro 62 – Influência do <i>acabamento e embalagem</i> sobre os RTQP – propriedades mecânicas	279
Quadro 63– Exemplo de folha para coleta de dados durante o ICV	317

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Mix</i> energético da produção de eletricidade em diversos países	49
Tabela 2 – Custo da poluição do ar como uma porcentagem do PIB.....	52
Tabela 3 – <i>Ranking</i> com as dez principais substancias que constituem o efluente liquido gerado pelas indústrias de manufatura no Canadá	54
Tabela 4 – Exemplo de aplicação da ANOVA.....	157
Tabela 5 – Exemplo de aplicação do teste de Tukey.....	157
Tabela 6 – Resultados do ICV para o estudo de caso 1.....	175
Tabela 7 – Resultados da AICV por tratamento – estudo de caso 1.....	188
Tabela 8 – Resultados da ANOVA do planejamento experimental envolvendo os 12 tratamentos.....	191
Tabela 9 – Resultados do teste de Tukey para o fator pressão	192
Tabela 10 – Resultados do teste de Tukey para o fator temperatura.....	192
Tabela 11 – Resultados da ANOVA dos modelos de regressão – estudo de caso 1	200
Tabela 12 – Resultados do ICV para o estudo de caso 2.....	211
Tabela 13 – Resultados da AICV por tratamento – estudo de caso 2	225
Tabela 14 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para as categorias PDRA, PFMP, PTHC e PTHNC	229
Tabela 15 – Resultados da ANOVA do planejamento experimental envolvendo os 27 tratamentos.....	229
Tabela 16 – Resultados da ANOVA dos modelos de regressão – estudo de caso 2	234
Tabela 17 – Matriz de monitoramento ambiental do processo: prensagem à quente.....	282
Tabela 18 – Matriz de monitoramento ambiental do processo: retificação <i>centerless</i> da haste....	286
Tabela 19 – Correlação entre RTQP e as etapas do ciclo de vida a jusante da manufatura: estudo de caso na indústria madeireira	308
Tabela 20 – Correlação entre RTQP e as etapas do ciclo de vida a jusante da manufatura: estudo de caso na automotiva.....	312

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Aços austeníticos cromo-níquel-manganês
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
BT	Teste de Bartlett
CE	Camada Externa
CEx	Condições Experimentais
CI	Camada Interna
CIRP	<i>Collège International pour la Recherche en Productique</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
C	Custo de Produção
CBN	Nitreto cúbico de boro
CVP	Ciclo de Vida de Produto
DFP	Diagrama de Fluxos de Processo
DS	Desenvolvimento Sustentável
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EBM	<i>Environmentally Benign Manufacturing</i>
EC	<i>European Commision</i>
ECM	<i>Environmentally Conscious Manufacturing</i>
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EF	Engenharia de Fabricação
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERM	<i>Environmentally Responsible Manufacturing</i>
FR	Fluxo de Referência
GEE	Gases de Efeito Estufa
GM	<i>Green Manufacturing</i>
H ₀	Hipótese Nula
H ₁	Hipótese Alternativa
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
ICV	Inventário do Ciclo de Vida

ILO	<i>International Labour Office</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IES	<i>Institute for Environment and Sustainability</i>
IPCC	<i>International Panel on Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LaMEM	Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira
LAPRAS	Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LCSA	<i>Life Cycle Sustainability Assessment</i>
LCM	<i>Life Cycle Management</i>
JRC	<i>Joint Research Council</i>
MA	Meio Ambiente
Máx	Máximo
MDICE SDP	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Secretaria do Desenvolvimento da Produção
Min	Mínimo
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NMVOC	<i>Non-methane Volatile Organic Compound</i>
NP	Número de passes na dressagem
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OAT	<i>One-at-a-time</i>
OECD DSTI	<i>Organization for Economic Co-operation and Development, Directorate for Science Technology and Industry</i>
PA	Potencial de Acidificação
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PDCA	<i>Plan Do Check Action</i>
PDCO	Potencial de Depleção da Camada de Ozônio
PDR	Potencial de Depleção de Recursos
PDRA	Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (fóssil e mineral)
PE	Potencial de Eutrofização
PEAD	Potencial de Eutrofização para Água Doce
PEcAD	Potencial de Ecotoxicidade para Água Doce
PEC	Potencial de Ecotoxicidade
PEF	<i>Product Environmental Footprint</i>
PEM	Potencial de Eutrofização Marinha
PET	Potencial de Eutrofização Terrestre

PFFO	Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio
PFMP	Potencial de Formação de Material Particulado/Inorgânicos Respiratórios
PIB	Produto Interno Bruto
PIP	Política Integrada ao Produto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRI	Potencial de Radiação Ionizante
PTH	Potencial de Toxicidade Humana
PTHC	Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Carcinogênicos
PTHNC	Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Não Carcinogênicos
P+L	Produção Mais Limpa
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
R	Representatividade
Ra	Rugosidade média aritmética
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
RTQP	Requisitos Técnicos de Qualidade dos Produtos
RONt	Circularidade total
S	Aços cromo-silício
SEP	Departamento de Engenharia de Produção
SET	Departamento de Engenharia de Estruturas
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
T	Tendência
TRI	<i>Toxic Release Inventory</i>
UF	Unidade Funcional
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNIDO	<i>United Nations Industrial Development Organization</i>
UN-WCED	<i>United Nations World Commission on Environment and Development</i>
USEPA	<i>U.S. Environmental Protection Agency</i>
USP	Universidade de São Paulo
VD	Velocidade de dressagem (rebolo de corte)
VF	Vazão de fluido

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	33
1.1.	Contexto de pesquisa.....	33
1.2.	Justificativa e relevância.....	34
1.3.	Objetivos	37
1.3.1.	Objetivo geral	37
1.3.2.	Objetivos específicos	37
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
2.1.	A indústria de manufatura	39
2.2.	Impactos ambientais da indústria de manufatura nos processos de fabricação	43
2.2.1.	Consumo de recursos	43
2.2.2.	Emissões	51
2.3.	Impactos ambientais da indústria de manufatura no CVP.....	56
2.4.	Avaliação do ciclo de vida de produtos	59
2.4.1.	Definição de objetivo e escopo	63
2.4.2.	Análise de inventário do ciclo de vida.....	71
2.4.3.	Avaliação de impacto do ciclo de vida	75
2.4.4.	Interpretação	78
2.5.	<i>Green manufacturing</i>	79
2.5.1.	O que é <i>GM</i> ?.....	83
2.5.2.	Motivações para a <i>GM</i>	86
2.5.3.	Barreiras e medidas de contorno.....	87
2.6.	Considerações finais sobre a revisão bibliográfica	89
3.	METODOLOGIA	91
3.1.	Método de pesquisa	91
3.2.	Procedimentos técnicos do método de pesquisa	92
3.2.1.	Pesquisa bibliográfica	92
3.2.2.	Estudo de caso	96
3.2.3.	Pesquisa experimental.....	99
4.	RESULTADOS.....	115
4.1.	Resultados do processo de desenvolvimento do procedimento de <i>GM</i>	115
4.1.1.	Análise das proposições teóricas	115
4.1.2.	Procedimento de <i>GM</i> proposto nesta tese.....	129

4.2. Resultados da aplicação do procedimento de GM	165
4.2.1. Estudo de caso 1: indústria madeireira – manufatura de painel aglomerado	165
4.2.2. Estudo de caso 2: indústria automotiva – manufatura de válvula de escape para motor ...	203
4.3. Versões simplificadas do procedimento de GM desenvolvido	235
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	241
5.1 Conclusões	241
5.2 Sugestões para trabalho futuros.....	245
REFERÊNCIAS.....	247
APÊNDICE A – Protocolo para realização dos estudos de caso	264
APÊNDICE B – Modelo de carta de apresentação utilizada nos estudos de caso.....	266
APÊNDICE C – Questionário panorama – parte A	268
APÊNDICE D – Ferramenta para guiar a realização da Etapa 4 da pré-avaliação.....	272
APÊNDICE E – Questionário panorama – parte B	280
APÊNDICE F – Matriz de monitoramento ambiental dos processos de manufatura.....	282
APÊNDICE G – Matriz de relacionamentos: correlação entre RTQP e aspectos ambientais das etapas de CVP a jusante da manufatura	307
ANEXO A – Folha de coleta de dados para realização do ICV	317

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto de pesquisa

Ainda persistem o emprego de processos produtivos poluentes e a utilização de recursos naturais de forma irracional, sem conhecimento prévio dos impactos associados à sua exploração, e dos meios existentes para a prevenção desses impactos. Entretanto, nas últimas décadas, a sociedade tem se mostrado cada vez mais preocupada com as questões ambientais (VENTURA, 2009). Corroborando para com essa preocupação, em 1987, a Comissão de Brundtland introduziu o conceito de Desenvolvimento Sustentável (DS), definindo-o como o “*desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades*” (UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT – UN-WCED, 1987). No âmbito ambiental do DS, é necessário limitar o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos ao meio ambiente a níveis que estejam condizentes com a capacidade limite da Terra.

Segundo Rahimifard et al. (2013), a capacidade suporte do planeta depende da combinação entre o crescimento populacional e a melhoria da qualidade de vida das pessoas, sendo necessário em prol do DS reduzir o impacto ambiental¹ por unidade de produto² manufaturado. Assim, destaca-se o conceito de **manufatura ambientalmente sustentável**, expresso pelo termo em inglês *Green Manufacturing (GM)*. A *GM* é tida como a manufatura de produtos que utiliza processos produtivos menos impactantes levando em conta iniciativas que venham a promover a conservação dos recursos naturais, e a minimização na geração de resíduos ao meio ambiente (AHN, 2014; DORNFELD et al., 2013).

Merchant, Dornfeld e Wright (2005) relatam sobre a evolução histórica do tema de Manufatura com enfoque mais voltado a eficiência operacional dos processos produtivos. Já a preocupação com a sustentabilidade dos processos produtivos passou a ter maior destaque a partir de 1990, visto que a manufatura de produtos pode apresentar relevantes impactos sobre o meio ambiente. Por exemplo, *International Energy Agency* (IEA, 2013) cita que 25,0% do consumo de energia no mundo está diretamente relacionado à indústria de manufatura.

Apesar de sua origem na década de 1990, para Silva, Ometto e Silva (2016) as pesquisas voltadas ao *GM* têm se intensificado apenas nos últimos anos, com destaque aos temas envolvendo a *GM* e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Todavia, há limitações nesta integração, as quais serviram de base para motivar a presente pesquisa (ver seção 1.2).

¹ Impacto ambiental é qualquer alteração do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2012).

² Produto é qualquer bem ou serviço constituído através de um processo de produção (ABNT, 2009a).

Assim, as questões que guiaram a condução deste trabalho foram: como a produção científica em *GM* tem se configurado? Como que a ACV e a *GM* estão relacionadas na literatura? Quais são as principais proposições teóricas³ existentes para subsidiar a *GM*? Quais são as limitações existentes nessas proposições, e de que forma seria possível superá-las?

Como resposta para as questões supracitadas, esta tese propõe o desenvolvimento e o teste de um procedimento de *GM* integrado à ACV, conforme será descrito ao longo da seção 4.

1.2. Justificativa e relevância

O procedimento de *GM* desenvolvido nesta tese se mostra relevante principalmente para:

- A **indústria**, pois será uma contribuição aos tomadores de decisão tendo em vista a crescente pressão sobre as empresas em reduzir os impactos ambientais não apenas na fase de fabricação dos produtos, mas onde eles são verdadeiramente significativos, i.e., tendo em vista a visão de ciclo de vida de produto (CVP);
- A **academia** (universidades, instituições de pesquisa), pois o procedimento proposto trata-se de uma contribuição inédita, que demonstra sobre como realizar a melhoria ambiental contínua do CVP por meio da melhoria ambiental de processos de manufatura específicos.

Nos últimos anos, tem crescido o número de publicações no tocante ao tema de *GM*. Porém, esses estudos são limitados, na medida em que:

- Para diversos autores, como Araújo (2010), Deif (2011), Despeisse et al. (2012a,b), Rusinko (2007), Silva e Amaral (2009), e Silva et al. (2013a), as propostas de melhoria ambiental de processos de manufatura se baseiam na aplicação da metodologia de Produção mais Limpa (P+L), que tem visão sobre o processo produtivo e não sobre o CVP. Isto faz com que as melhorias ambientais abordadas possam não ser as mais efetivas, pensando numa redução substancial das cargas ambientais por unidade de produto posto no mercado. Nessa linha, Dornfeld et al (2013) e Kellens et al. (2012a,b) citam a necessidade de **adaptar o uso da ACV** para a avaliação ambiental de processos produtivos. Nesta tese, a referida adaptação da ACV é realizada no escopo no procedimento de *GM* desenvolvido;
- Dornfeld (2014) e Helu, Vijayaraghvan e Dornfeld (2011) exaltam a etapa de manufatura pela sua capacidade de influenciar nos impactos ambientais de outras etapas de CVP. As decisões tomadas durante a manufatura podem fazer com que haja mais ou menos impactos sobre o meio ambiente durante a extração e beneficiamento de recursos, uso ou fim de vida de produtos. Isso ocorre, pois durante a manufatura são definidos **parâmetros de**

³ O termo proposição teórica se refere aos artigos científicos que apresentaram propostas de sistemas, metodologias, *frameworks*, métodos, técnicas, modelos ou de ferramentas para promover o *green manufacturing*.

processo (e.g., temperatura, pressão, velocidade, etc.), os quais irão demandar mais ou menos recursos (materiais e energia) para a manufatura. Portanto, esses parâmetros podem influenciar nos impactos ambientais a montante, i.e., durante a etapa extração e beneficiamento de recursos naturais. Neste mesmo raciocínio, produtos manufaturados apresentam certas características ou **requisitos técnicos de qualidade** (e.g., propriedades físico-mecânicas). Esses requisitos podem ter influência nos impactos ambientais à jusante, i.e., durante as fases de uso e de pós-uso dos produtos. Portanto, é desejável que os estudos de *GM* incluam uma análise de contribuição da etapa de manufatura para com os impactos ambientais a montante e a jusante no CVP, levando em conta os parâmetros de processo e os requisitos técnicos de qualidade que efetivamente possam ser significativos para os impactos ambientais analisados. Contudo, como será detalhado na seção 4.1.1, esta análise de contribuição não tem sido abordada pelas principais publicações de *GM* existentes. Assim, a referida análise de contribuição foi incluída no escopo do procedimento de *GM* desenvolvido;

- Filleti et al. (2014), Kellens et al. (2012a) e Overcash, Twomey e Isaacs (2009) explicam que durante o uso da ACV, incertezas nos dados de inventário de processos de manufatura ocorrem devido a existência de dados defasados e com documentação precária. Os autores explicam que isso pode ser facilmente verificado ao se analisar os inventários disponíveis em bases de dados internacionais em ACV, estando entre os problemas mais comuns: 1) a consideração de processos do tipo *black-box* (processos agregados, não estratificados em nível de operação de manufatura); 2) a existência de escassos inventários para processos discretos de manufatura (e.g. usinagem, prensagem, extrusão, etc.); 3) a disponibilização de dados antigos e para processos tecnologicamente defasados; 4) e a má documentação técnica sobre a coleta, tratamento, validação e divulgação dos dados de inventário. A metodologia proposta por Kellens et al. (2012a) possibilita reduzir parte desses problemas, e por isso, foi incorporada no escopo desta tese conforme detalhes que serão abordados na seção 4.1.2;
- Como será discutido ao longo da seção 2.4, a metodologia proposta por Kellens et al. (2012a), embora traga benefícios visando a **redução de incertezas** de dados de inventário, ela possui limitações: 1) não incluir a visão completa de CVP (i.e., visão *cradle-to-grave*); 2) não incluir nos limites do sistema estudado os fluxos a montante dos recursos materiais e energéticos consumidos na manufatura; 3) se limitar somente ao inventário dos aspectos ambientais⁴, e não se preocupar com a mensuração dos respectivos impactos associados. Já nesta tese, tais limitações foram abordadas de modo a incluir formas para superá-las;
- Conforme será discutido ao longo da seção 4.1.1, a maioria dos estudos de *GM* que não assumiram a etapa de manufatura como um *black-box*, avaliaram algum tipo específico de

⁴ Aspecto ambiental é o elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente (ABNT, 2009a).

processo de fabricação, com destaque para as operações de usinagem, estudadas por diversos autores como Dahmus e Gutowski (2004), Duflou et al. (2012), Filleti et al. (2014), Kellens et al. (2012b), Linke e Overcash (2012), e Murray, Zhao e Sutherland (2012). Todavia, visando uma redução substancial dos impactos ambientais é desejável que primeiro sejam identificados os processos de manufatura mais relevantes na visão de CVP. Assim, foi incluída a **seleção dos processos de manufatura** mais relevantes na visão de CVP como sendo a primeira etapa para a aplicação do procedimento de *GM* proposto nesta tese;

- Por fim, também será discutido ao longo dos resultados da seção 4.1.1 sobre a utilização de **indicadores ambientais** na manufatura. Tais indicadores verificados na literatura focaram em sua maioria somente nos aspectos ambientais e não nos impactos potenciais, e tão pouco, incluíram a visão de CVP. Assim, visando superar tais limitações, esta tese sugere a utilização de indicadores com foco nos impactos potenciais mais relevantes para o CVP.

Perante o exposto, a seção 1.3 elenca os objetivos desta tese e a Figura 1 ilustra a relação teórico-prática desta pesquisa. A parte teórica focou no desenvolvimento do procedimento de *GM* a partir de pesquisa bibliográfica (detalhes na seção 4.1.2), e a parte prática se remete ao teste do procedimento por meio de estudos de casos múltiplos (detalhes na seção 3.2.2) e de experimentos (detalhes na seção 3.2.3) para os processos de manufatura estudados.

Figura 1 – Estrutura teórico-prática desta pesquisa
Fonte: elaborado pelo autor

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

- O objetivo geral é desenvolver e testar um procedimento de *GM* integrado a ACV para a avaliação e o monitoramento ambiental de processos de manufatura.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão crítica sobre as principais proposições teóricas de *GM* existentes na literatura;
- Adaptar o uso da metodologia de ACV para o contexto de processos de manufatura;
- Desenvolver um procedimento para a definição dos processos de manufatura que ambientalmente sejam mais relevantes dentro da visão de CVP;
- Desenvolver um procedimento que identifique os parâmetros de processo de manufatura mais relevantes frente aos impactos ambientais do CVP;
- Desenvolver um procedimento que identifique os requisitos técnicos de qualidade do produto mais relevantes frente aos impactos ambientais do CVP;
- Desenvolver um procedimento que estabeleça indicadores de desempenho ambiental na manufatura com a visão de CVP;
- Realizar estudos de caso para o teste prático do procedimento consolidado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A indústria de manufatura

Dilworth (1992) introduz uma reflexão sobre a importância da indústria de manufatura⁵. Para isso, o autor sugere imaginar como seria viver em um mundo onde, para além das famílias, não existisse mais nenhum tipo de grupo organizado de pessoas para o fornecimento dos mais diversos produtos de que uma sociedade precisa (alimentos, móveis, roupas, medicamentos, eletrodomésticos, etc.). Nesta situação, cada família obrigatoriamente teria que produzir suas próprias roupas e preparar suas próprias refeições a partir de recursos que teriam que extrair da natureza. Além disso, cada família teria que cuidar da sua própria saúde, zelar pela educação dos filhos, deslocar-se a pé por até grandes distâncias, etc. Numa sociedade assim, não haveria automóveis, internet, televisão, telefone, etc., e as pessoas viveriam como há centenas de anos atrás. Portanto, a indústria de manufatura se mostra essencial (GROOVER, 2007; KALPAKJIAN, 2001), pois é responsável por suprir a demanda de produtos para a sobrevivência, o bem estar e a melhoria da qualidade de vida das pessoas.

Groover (2007) explica que a palavra manufatura vem do Latim *manus* (mãos) e *factus* (fazer), significando “*fazer com as mãos*”, e que até início da I Revolução Industrial, em 1750, a manufatura de produtos era feita manualmente, e voltada para o consumo familiar ou em pequenas comunidades. Somente após a II Revolução Industrial, na segunda metade do século XIX, que começaram a surgir e que se passou a utilizar as primeiras máquinas para a manufatura de produtos visando obter maior escala e variedade de produtos.

Com a evolução da indústria de manufatura até os dias atuais, a definição do termo manufatura também evoluiu. Atualmente, conforme Kalpakjian (2001) a manufatura é vista como: “*o uso de máquinas, ferramentas e mão de obra para a produção de produtos para uso ou venda*”, referindo-se normalmente à produção em escala industrial, onde recursos materiais e energéticos são fisicamente e/ou quimicamente transformados em produtos acabados em larga escala. Para Groover (2007) os processos de manufatura são aqueles que realizam operações de processamento (e.g., usinagem, prensagem) ou de montagem no ambiente fabril. Além disso, o termo manufatura é comumente referenciado na literatura por “*produção*” e por “*fabricação*”, sendo todos tratados nesta tese como sinônimos.

Para *Sustainable Manufacturing Initiative* (2011) e *United Nations Statistics Division* (2014) a indústria de manufatura é um setor da economia organizado em subdivisões:

⁵ A indústria de manufatura ou manufatureira é o conjunto de empresas responsável pelo fornecimento dos mais diversos produtos que uma sociedade demanda. Cada empresa é tida como uma organização especializada em fabricar produtos em larga escala (DILWORTH, 1992; KALPAKJIAN, 2001).

- Manufatura de alimentos;
- Manufatura de autoveículos e de outros equipamentos de transporte;
- Manufatura de bebidas e fumos (e.g., refrigerantes, bebidas alcóolicas, cigarros);
- Manufatura de combustíveis (e.g., diesel, gasolina, álcool);
- Manufatura de eletroeletrônicos e de eletrodomésticos;
- Manufatura de embalagens para uso doméstico e industrial;
- Manufatura de máquinas e de equipamentos para uso doméstico e industrial;
- Manufatura de materiais de base (e.g., ferro, aço, cimento, alumínio, cerâmicas);
- Manufatura de móveis para uso doméstico e comercial;
- Manufatura de papel e celulose;
- Manufatura de produtos fármacos e de higiene pessoal (e.g., remédios, cosméticos);
- Manufatura de substâncias e de produtos químicos (e.g., conservantes, fertilizantes);
- Manufatura de vestimentas e de acessórios (e.g., calçados, roupas, bolsas).

Estas subdivisões se relacionam na forma de uma cadeia de suprimentos. Por exemplo, a subdivisão *manufatura de materiais de base* pode fornecer matéria prima para a subdivisão *manufatura de máquinas e de equipamentos para uso doméstico e industrial*, já esta última, pode fornecer máquinas para a subdivisão *manufatura de produtos alimentícios*. Além disso, cada subdivisão direta ou indiretamente se associa a outros setores da economia, como a Agricultura, Pecuária, Construção Civil, e o setor de Serviços. Por exemplo, os setores de Agricultura e de Pecuária fornecem matérias primas para a subdivisão de *manufatura de produtos alimentícios*, e esta por sua vez, se relaciona com o setor de Serviços, pois o varejo e o atacado comercializam os alimentos manufaturados. Em virtude dessas interações, a indústria de manufatura se destaca por sua relevância socioeconômica (UNEP, 2011).

Segundo dados do *International Labour Office* – ILO (2011), em 2009, a indústria manufatureira foi responsável por 23,0% dos empregos mundiais, o que representa mais de 660 milhões de pessoas empregadas. Na Europa, a indústria de manufatura representa 22,0% do Produto Interno Bruto (PIB) e 70,0% dos empregos diretos e indiretos (MANUFUTURE, 2004). Em países desenvolvidos como a Austrália, a indústria cresce a uma taxa média de 0,8% ao ano desde a década de 1990, e atualmente representa 36,0% das exportações do país empregando 1,05 milhões de pessoas (SUSTAINABLE MANUFACTURING INITIATIVE, 2011). No Reino Unido, a indústria cresceu a uma taxa média de 2,3% ao ano entre 1980-2009 (FORESIGHT, 2013). Já nos países em desenvolvimento, segundo *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO, 2010), a contribuição da indústria de manufatura para o PIB também é relevante, pois aumentou em quase 22,0% em 2009, em

comparação aos 18,0% em 1990. No Brasil, a indústria representa cerca de 27,0% do PIB, emprega mais de 11,0 milhões de trabalhadores (mercado formal), com destaque para o aumento na produção das indústrias de cimento, de fertilizantes, e de aço bruto, que cresceram mais de 5,0% no período de 2010/2011 (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR, SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO DA PRODUÇÃO – MDICE SDP, 2012). Portanto, a indústria é um dos pilares que sustentam a economia de um país, haja vista seu impacto sobre o PIB e sobre a empregabilidade.

A Figura 2 apresenta um comparativo sobre a participação da indústria no comércio de mercadorias em várias regiões do mundo, especialmente na América do Norte, Europa e Ásia.

Figura 2 – Estrutura setorial do mercado de exportações no mundo por região em 2006
Fonte: Adaptado de Jovane et al. (2008)

Pela Figura 2, verifica-se que as Américas do Sul e Central se destacam pela participação da exportação de minerais e de combustíveis. Isso se confirma no caso do Brasil, pois segundo estatísticas do MDICE SDP (2012), as principais exportações do país em 2011 foram representadas por minérios de ferro e seus concentrados (16,3%), e óleos brutos de petróleo (8,4%); porém, produtos manufaturados como partes e peças para autoveículos, alimentos (e.g., grãos e carnes), pasta química de madeira, ferro-ligas, etc., totalizaram 17,7% das exportações, o que confirma a importância da indústria na economia brasileira.

Contudo, a influência socioeconômica da indústria de manufatura no Brasil e no mundo é abalada pela **Crise Ambiental** (ver Figura 3), que segundo Braga et al. (2011) pode ser entendida como o desequilíbrio entre os elementos: população, recursos naturais, e poluição:

- **População:** a população mundial já supera os 7 bilhões (KUNZIG, 2011). A população tem demandas, desde necessidades básicas (alimentar-se, vestir-se, ter um lugar para morar, etc.) até desejos almejados (a compra de um carro novo, um celular mais moderno, etc.). E para satisfazer tais demandas a indústria de manufatura produz produtos, o que pode promover a escassez de recursos e a poluição do meio ambiente (KEINAN; CLARK, 2012);
- **Recursos naturais:** os recursos do planeta podem ser do tipo material, tais como vegetais, água, solo, ou na forma de energia, como radiação solar, energia geotérmica e, óleo bruto de petróleo. Esses recursos são utilizados como matéria prima pela indústria de manufatura durante a produção dos mais diversos produtos; e
- **Poluição:** resíduos, emissões, ou poluentes são gerados e liberados ao meio ambiente, resultando na poluição. A poluição afeta a qualidade do meio ambiente de alguma forma, podendo comprometer negativamente a existência das formas vivas e não vivas na Terra, por meio de impactos ambientais diversos, como os mostrados na Figura 3.

Figura 3 – Relação entre os principais elementos da Crise Ambiental
Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 3 mostra que a indústria tem influência direta sobre os impactos ambientais, pois ela está no centro do “*triângulo*” formado pelos elementos da **Crise Ambiental**. A indústria pode produzir produtos completos a serem destinados aos consumidores finais, ou produtos intermediários (e.g., partes de veículos, plástico, chapas de metal), os quais servirão de matérias primas para outras indústrias antes de constituírem os produtos finais. Independentemente do caso, para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004a), todo o produto causa impactos sobre o meio ambiente, podendo ocorrer durante os processos de manufatura, ou em qualquer outra etapa do CVP.

Assim, na seção 2.2 será discutido sobre como as atividades de manufatura podem afetar negativamente o meio ambiente, em termos de escassez de recursos naturais e de geração de poluição. Já na seção 2.3 será discutido sobre como que a etapa de manufatura pode influenciar nos impactos ambientais gerados em outras etapas do CVP (extração e beneficiamento de recursos, uso, e fim de vida).

2.2. Impactos ambientais da indústria de manufatura nos processos de fabricação

Foresight (2013) e UNEP (2011) afirmam que a escassez de recursos naturais é um desafio para este milênio, principalmente a escassez de água doce, petróleo e minerais, e que isso se deve em grande parte à indústria de manufatura, pela exploração de forma irracional dos recursos naturais e pelo emprego de processos de fabricação poluentes.

Para *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD, 2008) e *European Commission* (EC, 2010), os minérios metálicos de alta qualidade estão sendo gradualmente esgotados e cada vez mais energia é necessária para extrair um mesmo conteúdo de metal útil, o que acresce também as emissões ao meio ambiente, em especial, os Gases de Efeito Estufa (GEE). De acordo com Diaz et al. (2010), 19,0% dos GEE no mundo se devem às atividades de manufatura. Nos Estados Unidos, os GEE gerados pela indústria equivalem a 1,4 bilhão de toneladas ao ano, cerca 26,0% do total emitido pelo país (ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION – EIA, 2011). Assim, por sua relevância, a seguir, os principais problemas ambientais enfrentados pela indústria de manufatura serão discutidos em duas partes: consumo de recursos (materiais e energia), e emissões (ao ar, água e solo).

2.2.1. Consumo de recursos

Conforme Braga et al. (2011) e Curi (2012), os recursos do planeta podem ser classificados em tipologias: recursos renováveis e recursos não renováveis.

- **Recursos renováveis:** são aqueles que podem ser recolocados na natureza se utilizados de forma correta. Esses recursos podem se regenerar a uma taxa equivalente ao seu consumo. Entretanto, um recurso natural renovável pode vir a se tornar não renovável quando a taxa de sua utilização supera a máxima capacidade de sustentação do meio ambiente. Entre os principais exemplos de recursos renováveis têm-se: a energia geotérmica, energia eólica, hidroeletricidade, a biomassa, a água, os ventos, as ondas do mar, e a radiação solar;
- **Recursos não renováveis:** os recursos não renováveis não podem ser regenerados ou reutilizados numa escala que possa sustentar a sua taxa de consumo. Portanto, tratam-se de recursos que uma vez extintos ou destruídos, desaparecem para sempre. Os principais

exemplos são os combustíveis fósseis e outros derivados do petróleo, o gás natural, e o carvão mineral. Outros exemplos de não renováveis são os minerais, as espécies e os habitats.

Para Braga et al. (2011), além de sua classificação em renováveis ou não renováveis, os recursos também podem ser usualmente designados em recursos materiais e energéticos.

Consumo de recursos materiais

Sobre o consumo de materiais na indústria de manufatura, Allwood e Cullen (2009) fazem uma projeção na Figura 4 sobre a demanda global por matérias prima chave como cimento, aço, papel, plástico e alumínio até 2050.

Figura 4 – Demanda mundial no consumo de cinco tipos de recursos materiais chave na indústria de manufatura
Fonte: Adaptado de Allwood e Cullen (2009)

As estimativas na Figura 4 mostram que a demanda global desses materiais tende a aumentar, i.e., a demanda por alumínio aumentará em três vezes, e a demanda por papel aumentará em duas vezes e meia até 2050. UNEP (2011) acrescenta que a produção mundial de aço sextuplicou entre 1950 e 2000, já a produção de alumínio duplicou entre 1980 e 2005. Nesta mesma linha, EC (2010) mostra uma lista com quatorze materiais que já apresentam risco real de escassez de fornecimento, sendo eles: antimônio, berílio, cobalto, fluorita, gálio, germânio, grafite, índio, magnésio, nióbio, metais do grupo platina (e.g. platina, paládio, irídio, ródio, rutênio e ósmio), terras raras (e.g. ítrio, escândio, e os chamados lantanídeos), tântalo, e tungstênio. Portanto, em termos de escassez de recursos materiais, destacam-se os recursos de origem não renovável como os minerais e metais.

Considerado um recurso essencial para a vida na Terra, o consumo de água também tem se mostrado um problema ambiental relevante. Apesar de ser um recurso renovável, Anjos Júnior (2011) explica que o excessivo consumo de água pode alterar o seu ciclo natural a ponto do consumo superar a capacidade suporte do ciclo, gerando assim a escassez hídrica. Como mostra a Figura 5, o consumo de água na indústria compete com a demanda por água na agricultura e para fins domésticos, em função da região analisada.

Figura 5 – Demanda mundial por água por região e para diferentes usos
Fonte: UNEP (2011)

Pela Figura 5, a proporção com a qual a indústria impulsiona a demanda por água em diferentes regiões do mundo varia de 3,0-30,0%, sendo que metade dessa água é para fins de resfriamento (UNEP, 2011). Para a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2012a) e Foresight (2013), o uso da água no setor industrial corresponde ao seu emprego como insumo, para fins sanitários, e em sistemas de resfriamento, caldeiras, etc.

No Brasil, dados do CNI (2012a) destacam a demanda no uso de água e a geração de efluentes líquidos pelas indústrias fabricantes de produtos têxteis, de produtos de fumo, celulose e papel, farmoquímicos e farmacêuticos, siderurgia, e extração de minerais não-metálicos. Além disso, projeções do *Water Resources Group* (2009) apontam que a indústria deve aumentar mundialmente em mais de 20,0% a demanda total de água até 2030, caso nada seja feito para uma redução substancial de seu consumo.

Como visto até aqui, houve um destaque para o consumo de materiais como os metais, minerais e a água. Porém, nem todos esses materiais são igualmente relevantes em termos de seus impactos ambientais. Pela Figura 6, UNEP (2010) apresenta a contribuição relativa do consumo de diversos materiais para diferentes categorias de impacto ambiental.

Figura 6 – Contribuição relativa de grupos de materiais para diferentes categorias de impacto ambiental
Fonte: UNEP (2010)

A Figura 6 mostra que os minerais dominam a categoria de consumo em massa, o que significa que no ciclo de vida da produção de minerais há um grande dispêndio mássico de recursos. Por outro lado, os mesmos apresentam relevância secundária para o aquecimento global, toxicidade humana, e o uso da terra, dominados pelos impactos devido ao consumo de

recursos energéticos, mais especificamente os combustíveis fósseis, seus derivados (plásticos) e materiais bióticos⁶ (UNEP 2010).

Consumo de recursos energéticos

Inicialmente é importante enfatizar que nas últimas décadas o consumo de recursos energéticos aumentou significativamente no mundo todo. Segundo dados do IEA (2012), entre 1971 e 2010 houve um aumento generalizado no consumo de energia, como mostra a Figura 7. Nota-se a importância da participação da energia não renovável no consumo global, como o óleo cru de petróleo, o gás natural, e o carvão mineral, os quais juntos representam historicamente mais da metade de todo o consumo de energia no mundo. Diante desse perfil, IEA (2012) exalta o setor industrial, o qual em 2010 foi responsável por 27,9% do consumo de energia no mundo e por 25,3% na Europa.

Figura 7 – Consumo mundial de energia entre 1971 e 2010, em milhões de toneladas de óleo equivalente (Mtoe)
Fonte: IEA (2012)

Nos Estados Unidos, a indústria e o setor de transporte lideram o consumo de energia. Porém, projeções a partir de 2020 realizadas por *U.S. Energy Information Administration* (2013), mostram que a indústria de manufatura deve aumentar ainda mais sua participação e ocupar posição de liderança no consumo global de energia. O consumo de energia em nível residencial e comercial se mostraram secundários no país, conforme detalhes na Figura 8.

⁶ Materiais bióticos são recursos vivos de um ecossistema que são extraídos da natureza para a produção de produtos e consumo, tais como a biomassa (madeira, e outros vegetais), e as espécies vivas (GUINÉE, 2001).

Figura 8 – Consumo de energia nos Estados Unidos por setor entre 1980 e 2040, em quadrilhões de Btu
 Fonte: U.S. Energy Information Administration (2013)

Para IEA (2012), Jeswiet e Sara (2008) e U.S. Energy Information Administration (2013), o consumo de energia em países desenvolvidos (e.g., Estados Unidos, Austrália, Canadá) e em países em desenvolvimento (e.g., China) ainda está altamente atrelado ao uso de energia não renovável. Portanto, o consumo de energia da indústria de manufatura também acaba sendo dependente da energia não renovável, e seu uso pode ocorrer de duas formas:

- **Consumo direto:** dentre as fontes de energia se destacam os óleos derivados do petróleo (e.g., diesel, óleos pesados), o carvão mineral, e o gás natural. O uso dessas fontes de energia na indústria é comum, principalmente para as atividades de geração de calor de processo, aquecimento direto e na movimentação de cargas no ambiente fabril. A geração de calor de processo pode ocorrer por meio de combustão de recursos energéticos para a para geração de vapor a ser utilizado em reatores químicos industriais, tratamentos térmicos, umidificação, hidratação, propulsão/movimento em turbinas, uso como fluido motriz em tubulações, etc.; sobre o aquecimento direto, trata-se da geração de calor, por exemplo, com a finalidade de processamento de alimentos (cocção), secagem de alimentos e materiais úmidos, e o uso em estufas; e sobre a movimentação de cargas, combustíveis como o diesel e o gás natural são utilizados por empilhadeiras e por outros veículos para o transporte de matérias primas, insumos e produtos (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2010).
- **Consumo indireto:** o consumo indireto de energia não renovável está intrinsicamente relacionado ao consumo de eletricidade (JESWIET; SARA, 2008). Na Tabela 1, é possível verificar o quão diferente pode ser o *mix* elétrico de diversos países, com destaque para o uso de fontes não renováveis de energia, as quais representaram de 10,7% (Brasil) a 92,7% (Austrália) do *mix* de cada país. Diversos autores, como Dornfeld et al. (2013), Gutowski,

Dahmus e Thiriez (2006), Jeswiet e Sara (2008) e Yan e Fei (2010) exaltam o consumo de eletricidade na manufatura porque as atividades industriais são realizadas utilizando-se máquinas (e.g., para usinagem, prensagem, montagem, etc.) e equipamentos (e.g., robôs) altamente dependentes da eletricidade para o seu funcionamento. Foresight (2013) e Merchant, Dornfeld e Wright (2005) explicam que desde a ascensão da Automação Industrial no século XX, a eletricidade passou a ter importância muito maior na indústria de manufatura, e que atualmente se mostra essencial visando: a integração de processos (e.g., combinação de diferentes operações por meio de robôs e máquinas transportadoras), o gerenciamento, controle e simulação da manufatura em tempo real de produção, e a inovação tecnológica.

Tabela 1 – *Mix* energético da produção de eletricidade em diversos países

		(%)				
Fonte de energia		Canadá ¹	Austrália ²	Espanha ³	Estados Unidos ⁴	Brasil ⁵
Não renovável	Carvão mineral	19	83,9	16,1	42	2,3
	Geotérmica	-	-	-	0,3	-
	Gás natural	7	8,5	28,5	25	4,7
	Óleo	-	0,3	0,9	3	2,8
	Nuclear	51	-	21,3	19	2,9
Renovável	Biomassa	-	-	-	1,3	6,1
	Eólica	-	-	15,4	0,5	0,5
	Hidroeletricidade	23	7,3	12,1	6,5	80,6
	Fotovoltaico	-	-	3,3	-	-
Outras		-	-	2,4	2,4	0,1
TOTAL		100	100	100	100	100

Fonte: 1,2 – Jeswiet e Sara (2008); 3 – Gabarrell et al. (2010); 4 – *U.S. Energy Information Administration* (2013); 5 – IEA (2013)

Segundo IEA (2013), o Brasil se destaca como exemplo na produção de eletricidade devido ao amplo uso de fontes de energia renovável (i.e., hidroeletricidade). Além disso, de acordo com CNI (2012b), fontes alternativas de energia renovável como a biomassa, e a energia eólica deverão desempenhar um papel essencial nos próximos anos para a manutenção da matriz elétrica nacional. O uso de fontes renováveis para a produção de eletricidade é importante, pois Dornfeld et al. (2013) explicam que os combustíveis fósseis contêm elementos como carbono, enxofre e nitrogênio, os quais geram poluentes durante a queima, como dióxido de carbono, dióxido de enxofre e os óxidos de nitrogênio. Estes

poluentes contribuem para impactos como o aquecimento global, e acidificação. Assim, fontes renováveis de energia devem ser integradas ao *mix* elétrico para a minimização dos referidos problemas ambientais (DORNFELD et al., 2013; JESWIET; SARA, 2008).

Todavia, somente a substituição das fontes não renováveis pelas fontes renováveis de energia no *mix* elétrico não é suficiente para reduzir substancialmente os impactos ambientais da indústria. Afinal, a indústria de manufatura pode apresentar um perfil de consumo de eletricidade mais intensivo (ou eletrointensivo) comparativamente a outros setores da economia, como mostra a Figura 9 para o caso do Brasil. Apesar do *mix* elétrico brasileiro ser basicamente composto por fontes renováveis de energia (rever Tabela 1), a indústria de manufatura se destaca como a maior consumidora de eletricidade em relação aos setores comercial, residencial e outros. Assim, a redução no consumo de eletricidade também deve ser objetivo principal para a minimização de impactos ambientais da manufatura. Para isso, é importante aumentar a eficiência energética dos processos mais eletrointensivos, reduzindo as perdas de energia, por exemplo, na forma de calor e ruído (EPE, 2010).

Figura 9 – Consumo de energia elétrica no Brasil por setor entre 2009 e 2011, em GWh
Fonte: MDICE SDP (2012)

CNI (2012b) destaca o rápido crescimento do consumo de eletricidade no Brasil nos últimos anos, pois entre 2006 e 2010, o consumo industrial de eletricidade aumentou 11,0%, representando 43,2% da demanda total de energia elétrica no país, ou 179.478 GWh em 2011,

conforme ilustrado na Figura 9. Entre as principais indústrias consumidoras de eletricidade no Brasil, destacam-se as siderúrgicas, indústrias químicas fina e de base, e as mineradoras.

Como visto, o consumo de energia na indústria de manufatura é relevante, especialmente quanto ao uso de energia não renovável e o consumo de eletricidade. O uso intensivo de energia na manufatura além de contribuir para a escassez de recursos também pode causar a geração de poluentes ao meio ambiente. Diaz et al. (2010) e Jeswiet e Sara (2008) ressaltam que o consumo de energia está diretamente atrelado às emissões de GEE. Já *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA, 2008) exaltam o setor de manufatura pela geração de emissões tóxicas ao ar (e.g., toxinas) e solo (e.g., resíduos sólidos). Assim, a seguir, é discutido também sobre como a indústria de manufatura pode impactar sobre o meio ambiente em termos de emissões para os compartimentos: ar, água e solo.

2.2.2. Emissões

Emissões ao ar

A poluição do ar é um efeito sentido em praticamente todas as grandes cidades do mundo, estando relacionado à emissão de gases e névoas, como resultado, principalmente, da queima de combustíveis fósseis (BRAGA et al. 2011). A queima de combustíveis fósseis lança uma grande quantidade de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (gás carbônico – CO₂), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos e material particulado na atmosfera. Além disso, outros exemplos de poluentes atmosféricos comuns são: gás fluorídrico (HF), amônia (NH₃), metano (CH₄), clorofluorcarbonos (CFCs), substâncias radioativas, pesticidas e o amianto (BRAGA et al., 2011; CURI, 2012).

A indústria de manufatura se destaca principalmente pelas emissões de GEE, tais como o CO₂, CH₄, e NO_x. Por outro lado, além dos GEE, as instalações industriais podem liberar poluentes como os materiais particulados, chumbo e outros metais pesados, CFCs, NH₃, toxinas, dioxinas e outras substâncias tóxicas (DORNFELD et al., 2013; UNEP, 2011; USEPA, 2008). Esses poluentes podem contribuir significativamente para problemas como as mudanças climáticas, os danos à saúde e segurança das pessoas e do meio ambiente.

Os GEE gerados pela indústria de manufatura se devem especialmente ao consumo direto e indireto de energia não renovável, e sua emissão induz os impactos associados ao aquecimento global/mudanças climáticas (INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2007). IPCC (2007) explica que existem dados apontando que a temperatura global do planeta deva aumentar de 1,4 a 5,8°C até 2100, e que tal mudança acarretará em danos ambientais drásticos como o declínio da biodiversidade, e a elevação do nível do mar. Sobre os

GEE no Brasil, entre 1994 e 2007 as emissões da indústria cresceram 77,0%, passando a ter importância muito maior como poluidoras (ARAÚJO, 2010). Na China, segundo Wan e Jianguo (2005), o carvão mineral utilizado nas termoeletricas contém 27,0% de cinzas e até 5,0% de enxofre, o que contribui significativamente para a geração de GEE. Nos Estados Unidos, *U.S. Energy Information Administration* (2013) registra que embora as emissões de GEE tenham reduzido entre 2005-2011, poderá haver um aumento nas emissões até 2040 em mais de 5,0%, como resultado das atividades da indústria e do setor de transportes.

Além dos problemas ambientais que as emissões atmosféricas podem causar, UNEP (2011) ressalta na Tabela 2 o custo da poluição do ar gerada pela indústria em função do PIB, tomando como base as emissões de SO_x, NO_x e compostos orgânicos voláteis (COVs).

Tabela 2 – Custo da poluição do ar como uma porcentagem do PIB

País	Ano	PIB (%)
China	2008	1,16-3,8
Estados Unidos	2002	0,7-2,8
Rússia	2002	2,0-5,0
União Europeia	2005	2,0
Ucrânia	2006	4,0

Fonte: UNEP (2011)

A Tabela 2 mostra que o custo da poluição do ar pode representar até 4,0% do PIB em países como China, Ucrânia e Rússia, merecendo a ressalva de que outras emissões de GEE, como CO₂ e CH₄ não foram incluídas. Na China, Wan e Jianguo (2005) explicam que com o aumento da industrialização e da população urbana, o custo da poluição do ar tem aumentado a cada ano, principalmente devido às emissões geradas pelo uso do carvão chinês nas termoeletricas. Nos Estados Unidos, o custo da poluição do ar sobre o PIB se deve principalmente à queima de combustíveis fósseis, que custa ao país aproximadamente US\$ 120 bilhões por ano com saúde, em grande parte para o tratamento de doenças respiratórias crônicas (e.g., bronquite e asma) e agudas (MENDELSON; MULLER, 2007).

No Brasil, conforme CNI (2012c), o país assumiu o compromisso de reduzir entre 36,1 e 38,9% suas emissões de GEE até 2020. Para isso, esforços têm sido realizados com foco nas indústrias de mineração, de papel e celulose, na indústria de alumínio, de cimento, e na indústria química. O total de emissões de GEE na indústria química reduziu 47,0% no período de 2001-2010, em virtude de ações como o aumento da participação da biomassa no consumo de energia, e o investimento em tecnologias para redução de emissões de N₂O e CH₄ (CNI, 2012c).

Outro problema relevante são as liberações de substâncias tóxicas ao ar, principalmente relacionadas às indústrias farmacêuticas, de couro e têxtil, e de papel e celulose (UNEP, 2011). Em 2007, as vendas mundiais de produtos químicos foram de 1,8 trilhões de euros, equivalente ao crescimento de 28,0% em relação a 2000. Todavia, dos milhares de produtos químicos no mercado somente uma pequena fração foi avaliada para determinar seus efeitos toxicológicos (PERENIUS, 2009). Alguns produtos químicos como os pesticidas e agrotóxicos que foram produzidos livremente pela indústria por muitos anos estão atualmente sob suspeita de carcinogenicidade⁷ (PERENIUS, 2009; USEPA, 2008).

Para solucionar estes problemas, a substituição dos combustíveis fósseis pelos de fontes renováveis e a proibição do uso de substâncias tóxicas têm acontecido gradativamente. Além disso, a instalação de equipamentos para a despoluição do ar se mostra uma possibilidade para tratar os poluentes emitidos pela indústria (BRAGA et al., 2011). Contudo, a adoção de alternativas proativas de prevenção da poluição podem contribuir mais eficazmente para evitar a geração dessas emissões prejudiciais, conforme será abordado na seção 2.5.

Emissões a água

Como abordado anteriormente na seção 2.2.1, o principal uso da água na indústria é para fins de resfriamento de processos produtivos. Todavia, a água também é usada industrialmente para outras atividades: lavagem de máquinas e equipamentos, reações químicas diversas, geração de vapor em caldeiras, uso em fluido de corte para processos de usinagem, enxágue e tingimento de produtos têxteis, acabamento de superfícies metálicas, pintura e envernizamento de peças e de componentes diversos, curtimento de couro, etc. (SELBORNE, 2001; UNEP, 2011). Tais usos acabam gerando fluxos de resíduos contaminados que requerem tratamentos antes de sua disposição final no meio ambiente.

A poluição da água (hídrica) ocorre quando os efluentes líquidos gerados não são devidamente tratados e são emitidos a corpos/cursos d' água, sendo que a composição dessa água não permite seu uso direto (consumo humano e animal) ou indireto (e.g. irrigação na agricultura). Braga et al. (2011) e Curi (2012) explicam que a água poluída pode possuir contaminantes de origem química, física ou biológica em sua composição. Os contaminantes químicos se caracterizam pela alteração da composição da água devido à ocorrência de reações químicas, podendo ser classificados em agentes orgânicos (e.g. proteínas, gorduras, solventes, hidratos de carbono) e inorgânicos (e.g. ácidos, sais solúveis, metais). Os contaminantes físicos não reagem quimicamente com a água, porém, afetam sua qualidade

⁷ Carcinogenicidade refere-se à possibilidade de uma substância ou agente, ser capaz de induzir a formação de câncer em seres humanos e em animais (EARLHAM COLLEGE, 2014).

(exemplos: alterações de pH e de oxigênio dissolvido). Já a contaminação biológica ocorre pelo aumento na quantidade de organismos e de microrganismos estranhos na água, como os coliformes, vírus, bactérias, e protozoários. *Canada Statistics* (2012) mostra na Tabela 3 que 90,0% do efluente líquido gerado pela indústria de manufatura no Canadá correspondem às emissões de amônia e nitratos, ou seja, contaminantes químicos inorgânicos.

Tabela 3 – *Ranking* com as dez principais substâncias que constituem o efluente líquido gerado pelas indústrias de manufatura no Canadá

Substâncias	Emissões a água (toneladas)	(%)
Nitrato (íon em solução com pH $\geq$ 6,0)	55.724	47,1
Amônia	51.210	43,3
Fósforo	6.053	5,1
Metanol	1.544	1,3
Manganês (e seus compostos)	1.256	1,1
TOTAL	115.787	97,9

Fonte: *Canada Statistics* (2012)

Algumas indústrias que se destacam no Brasil pelos altos volumes de efluentes líquidos são as de fabricação de produtos têxteis, fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos, e as indústrias de papel e celulose. Para CNI (2012a), as indústrias têxteis podem gerar de 35,0-96,0 m³ de efluente / t de fibra produzida; nas indústrias farmoquímicas e farmacêuticas, o volume de efluentes líquidos pode atingir até 250 m³ de efluente / t de produto; e nas fábricas de papel e celulose o volume pode variar de 22,7-41,0 m³ / t de papel.

Para Prüss-Üstün e Corvalán (2006) o contato humano direto ou indireto com água poluída pode gerar doenças diversas, como hepatite, cólera, leptospirose, diarreias e até mesmo a incidência de câncer. Também é possível ocorrer doenças em peixes e mutações cromossômicas em plantas ao longo de rios poluídos em regiões industrializadas (MORAES; JORDÃO, 2002). Sobre os impactos não toxicológicos, Wenzel, Hauschild e Alting (1997) destacam a eutrofização, que representa o enriquecimento abrupto e excessivo de nutrientes na água/solo a partir da presença de substâncias à base de nitrogênio ou fósforo, por exemplo, provenientes da produção e uso de fertilizantes agrícolas.

No Brasil, dados do CNI (2012a) indicam uma redução considerável nos volumes de uso de água nos setores automotivos e na indústria química nos últimos anos. Na indústria automotiva, entre 2008 e 2011, ocorreu uma redução da ordem de 30,0% na captação de água, enquanto que na indústria química houve redução de 34,0% entre 2001 e 2010. Isso é resultado principalmente da adoção de estratégias mitigadoras de controle da poluição, as

quais segundo Selborne (2001) envolvem: a reciclagem e o reuso/recirculação da água dentro do ambiente fabril, e a instalação de estações de tratamento de efluentes.

Por fim, sobre o tratamento de efluentes, no Canadá, em 2009, o volume total de efluente líquido gerado pela indústria de manufatura foi de 3,6 bilhões de metros cúbicos, sendo que o custo com tratamento e disposição final desses resíduos foi de \$ 532,2 milhões, com destaque para a indústria de papel e celulose (\$ 189,3 milhões), e a indústria alimentícia (\$ 91,7 milhões) (CANADA STATISTICS, 2012). Portanto, o tratamento de efluentes se mostra uma atividade custosa para a indústria. Por outro lado, é possível reduzir os problemas de poluição da água tomando como base medidas proativas, como será discutido na seção 2.5.

Emissões ao solo

A poluição do solo decorre da emissão de substâncias químicas na superfície terrestre podendo causar perda de uma ou mais das funções do solo, como: desertificação do solo, erosão, lixiviação, infiltração de poluentes no solo/subsolo, etc. (BRAGA et al., 2011; MORITA, 2010). O solo poluído se caracteriza pela presença de resíduos sólidos e/ou de efluentes líquidos, resultantes das atividades industriais, agrícolas e urbanas. A poluição industrial se deve a geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos, em geral, associados à liberação de produtos químicos, de metais pesados, e de sobras de matérias primas e produtos, que são descartados inadequadamente no meio ambiente (VAN-CAMP et al., 2004).

Com relação às atividades industriais que mais contribuem para a contaminação do solo, Van-Camp et al. (2004) realizaram um levantamento na Europa onde destacaram a geração de resíduos sólidos principalmente nas indústrias metalomecânicas, de produtos químicos, de produtos à base de madeira, têxtil, e couro numa lista com quarenta e uma empresas.

Dornfeld et al. (2013) destacam a geração de resíduos sólidos durante as atividades de manufatura conforme ilustrado na Figura 10. Tratam-se de resíduos nos estados sólido (e.g., restos de alimentos, cinzas, cavacos de metal) e semissólido (e.g., lodos, óleos contaminados), os quais, no Brasil, podem ser classificados em: resíduos perigosos (são aqueles que apresentam características como inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, etc.) e não perigosos (inertes ou não inertes) (ABNT, 2004b).

Como mostrado na Figura 10, a quantidade de resíduos sólidos gerados pela indústria supera inclusive o total dos demais setores se somadas suas quantidades individuais. Também como reportado por Gutowski (2004) e Park e Labys (1998), os Estados Unidos é o maior gerador de resíduos sólidos no planeta, seja em números absolutos ou per capita.

Figura 10 – Geração de resíduos sólidos nos Estados Unidos em diferentes setores
Fonte: Adaptado de Dornfeld et al. (2013)

Muitas doenças estão associadas à poluição do solo, como o câncer (pela contaminação do solo com substâncias químicas da produção e uso de pesticidas e herbicidas), malária (pela presença de efluente líquido misturado ao solo), e doenças nos rins e fígado (pela presença de metais pesados no solo como o mercúrio e os ciclodienos) (MORITA, 2010; VAN-CAMP et al., 2004). Além disso, a eutrofização também pode impactar sobre os ecossistemas terrestres, levando inclusive a perda de biodiversidade (WENZEL, HAUSCHILD e ALTING, 1997).

CNI (2014) exalta no Brasil as indústrias de alumínio, aço, cimento, mineração, a indústria química, têxtil, automobilística, o setor elétrico, eletroeletrônico, florestal, e a agroindústria canvieira, devida as iniciativas que têm sido tomadas visando à minimização da geração de resíduos sólidos. Nessa linha, como medidas de controle, Braga et al. (2011) e Van-Camp et al. (2004) citam métodos que vão desde a reciclagem no próprio ambiente fabril, passando pela venda/doação de resíduos, a incineração, a compostagem, e por fim, a disposição em aterros. Contudo, tais métodos de controle da poluição do solo são limitados, pois não focam na redução dos resíduos na fonte geradora.

2.3. Impactos ambientais da indústria de manufatura no CVP

Além dos impactos diretos gerados durante os processos de fabricação, a etapa de manufatura também se destaca por sua capacidade de influenciar nos impactos ambientais de outras etapas do CVP. Assim, a *Organisation for Economic Co-operation and Development, Directorate for Science Technology and Industry* (OECD DSTI, 2011) descreve na Figura 11 o relacionamento entre manufatura e meio ambiente numa visão de CVP.

Figura 11 – Relação entre manufatura e o meio ambiente numa visão de CVP
Fonte: Adaptado de OECD DSTI (2011)

Na Figura 11, Dornfeld et al. (2013) exaltam a etapa de **manufatura**, pois ela é crucial dentro da visão de CVP, afinal, é nela que são definidas as características de desempenho dos produtos, as quais poderão influenciar de modo significativo nos impactos ambientais de etapas anteriores (i.e., extração e beneficiamento de recursos) e posteriores (i.e., uso, e pós-uso) à manufatura, conforme explicado a seguir:

- **Etapa de extração e beneficiamento de recursos:** para Jacquemin, Pontalier e Sablayrolles (2012) é possível otimizar os processos produtivos para que produzam uma mesma quantidade de produtos a um menor impacto sobre o meio ambiente, sendo para isso necessário: (1) mudança nas condições de trabalho de máquinas e equipamentos, e (2) evolução tecnológica. Sobre o item (1), trata-se de modificar parâmetros de processo (e.g., temperatura, pressão, vazão) mantendo-se a qualidade dos produtos manufaturados, resultando na redução do consumo de materiais e de energia, e/ou minimizando a geração de resíduos. Por exemplo, Dahmus e Gutowski (2004) explicam que em processos de usinagem é importante reduzir a potência de corte, pois assim, durante a fase de extração e beneficiamento de recursos poderá haver uma menor demanda pelo consumo de recursos energéticos utilizados na geração da eletricidade consumida pelo processo de usinagem. Ainda nessa linha, em outro estudo envolvendo diversos tipos de processos de usinagem, Duflou et al. (2012) destacaram o efeito do parâmetro taxa de remoção de material sobre o consumo de eletricidade na usinagem, sendo necessário limitar a faixa de variação do parâmetro a limites ecoeficientes. Sobre o item (2), trata-se de uma mudança mais complexa, tanto que Dornfeld et al. (2013) citam a barreira tecnológica como uma limitação, pois muitas

vezes a indústria tem que contar com certas tecnologias de produção poluentes, mas que não podem ser evitadas devida à falta de outras tecnologias mais adequadas no momento;

- **Etapas de uso:** Dornfeld (2014) afirma que é importante avaliar se as decisões tomadas durante a manufatura podem afetar o desempenho ambiental dos produtos durante sua fase de uso, e para isso, exalta a necessidade de avaliar a influência dos **requisitos técnicos de qualidade dos produtos – RTQP** (e.g., propriedades físicas, químicas e mecânicas) sobre os impactos ambientais durante a fase de uso dos produtos. Nessa linha, Helu, Vijayaraghvan e Dornfeld (2011) explicam que no caso dos automóveis a eficiência operacional dos veículos pode ser medida com base no consumo de combustível, o qual depende diretamente dos RTQP das peças que compõem o automóvel, com destaque para a qualidade superficial requerida ao virabrequim e ao eixo do comando de válvulas. Assim, um automóvel que consome menos combustível deverá impactar menos sobre o meio ambiente, pois na sua etapa de uso haverá uma menor liberação de GEE, e na sua etapa de extração e beneficiamento de recursos haverá uma menor demanda por óleo bruto fóssil usado na produção do combustível;
- **Etapas de fim de vida:** a influência da etapa de manufatura sobre os impactos da fase de pós-uso dos produtos também pode ser relevante, especialmente quando adotadas estratégias de reciclagem e de remanufatura (GARETTI; TAISCH, 2012; ILGIN; GUPTA, 2010). Ilgin e Gupta (2010) destacam a reciclagem e a remanufatura como importantes estratégias para subsidiar a *GM*. Estas estratégias possibilitam a produção em ciclo fechado, reduzindo assim os impactos sobre o meio ambiente não somente durante o pós-uso, mas também durante as etapas de manufatura, e de extração e beneficiamento de recursos. Contudo, a possibilidade de reciclar e de remanufaturar produtos dependerá dos materiais empregados nos produtos e de seus RTQP. Por exemplo, Silva (2012) estudou a manufatura de painéis de madeira utilizando resina à base de formaldeído, a qual limita as possibilidades de reciclagem/remanufatura do produto. Pelo fato da resina ser composta por formaldeído, o painel de madeira não pode ser queimado em caldeiras convencionais, e também a remanufatura do painel é comprometida, pois a resina utilizada é termofixa (SILVA, 2012).

Em síntese, a etapa de manufatura de produtos pode influenciar nos impactos ambientais a montante (i.e., etapa de extração e beneficiamento de recursos) e a jusante (uso e de fim de vida), muito em função, respectivamente, das escolhas dos **parâmetros de processo** e dos **RTQP** conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Relação entre parâmetros de processo de manufatura e os RTQP
Fonte: elaborado pelo autor

2.4. Avaliação do ciclo de vida de produtos

Como discutido na seção 2.3, a indústria de manufatura pode gerar impactos ambientais de modo indireto em etapas a montante e a jusante da manufatura, para todo o CVP. Assim, merece destaque uma discussão sobre a **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**.

A ACV surgiu da crescente conscientização quanto à necessidade de reduzir os impactos ambientais associados aos produtos, não somente na fase de fabricação, mas sim, com foco onde esses impactos sejam mais significativos, e, portanto, tendo em vista o CVP (ABNT, 2009a,b). A ACV é regida pelo conceito de CVP, entendido por “conjunto de todas as etapas necessárias para que um produto cumpra sua função, contando da aquisição dos recursos naturais aplicados na sua fabricação até sua disposição final após o cumprimento da sua função” (ABNT, 2009a), conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Etapas do ciclo de vida de um produto

Fonte: Adaptado de UNEP (2007)

Numa revisão bibliográfica sobre o passado, presente e o futuro da ACV, Guinée et al. (2011) organizaram seu contexto histórico da seguinte forma:

- **Passado:** composto por um **período de concepção** (1970-1990) e por um de **convergência** (1990-2000). Durante o período de concepção, foi desenvolvido o conceito de CVP da Figura 13. Segundo Hunt e Franklin (1996), em 1969, a visão de CVP foi primeiramente utilizada durante um estudo designado por *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA), conduzido pelo *Midwest Research Institute*, nos Estados Unidos, para a Companhia Coca Cola, visando analisar e comparar os efeitos do uso de diferentes tipos de embalagens de bebidas sobre o meio ambiente. Ainda durante a década de 1970, outros estudos REPA foram realizados, contudo, somente no início da década de 1990 (período de convergência) que a sigla ACV passou a ser utilizada e que ganhou maior destaque como técnica de gestão ambiental. Para Guinée et al. (2011) e Thorn, Kraus, Parker (2011) as três décadas de período de concepção da ACV se deve principalmente: 1) a falta de uma consciência ambiental proativa da sociedade da época para com os problemas ambientais existentes; 2) e a complexidade para a condução da ACV na medida em que muitos dados quantitativos sobre os aspectos ambientais de todas as etapas do CVP eram demandados, e o acesso a essas informações era limitado. De 1990-2000, houve uma convergência sobre o uso, aplicação e a metodologia de ACV em consequência de sua normalização perante a série ISO 14000. Em 1992, a *International Organization for Standardization* (ISO) criou o Comitê Técnico TC207/SC 5, que se dividiu em cinco grupos, estando cada um responsável pela

criação das seguintes normas: grupo 1 – ISO 14040:1997 (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*); grupo 2 e grupo 3 – ISO 14041:1998 (*Environmental management – Life cycle assessment – Goal and scope definition and inventory analysis*); grupo 4 – ISO 14042:2000 (*Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment*); e grupo 5: ISO 14043:2000 (*Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation*). Por fim, este período também se destacou pelo surgimento dos primeiros métodos para a avaliação dos impactos ambientais de produtos sob a perspectiva de CVP, com destaque para o CML 1992 (HEIJUNGS et al., 1992), EDIP 1997 (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997) e Eco-indicator 99 (GOEDKOOP; EFTING; COLLIGNAN, 2000);

- **Presente:** Guinée et al. (2011) define o momento presente como **período de elaboração**, pois atualmente há muita divergência em questões ao entorno da ACV, tais como: a escolha das categorias de impacto e dos métodos para avaliação dos impactos ambientais, a inclusão dos aspectos sociais e econômicos de modo integrado à metodologia de ACV, os problemas das incertezas nos dados de inventário nos bancos de dados, etc. Maiores detalhes sobre estas limitações serão discutidos ao longo das seções 2.4.1 a 2.4.4. Entre 2000-2010, Guinée et al. (2011) destacaram a revisão das normas de ACV, as quais tiveram validade até 2005, sendo substituídas pelas versões atuais ISO 14040:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*) e ISO 14044:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*). Outro fator relevante tem sido a inclusão da ACV junto às políticas públicas de cunho ambiental, com destaque para a Política Integrada ao Produto (PIP), por intermédio da qual se incentiva um consumo “*mais verde*”, via taxaço de impostos diferenciada entre produtos menos poluentes em relação aos mais poluentes de um mesmo setor (GUINÉE et al., 2011; HAUSCHILD; JESWIET; ALTING, 2005). Finnveden et al. (2009) exaltam ainda, desde a última década, o grande número de publicações envolvendo o uso da ACV para a melhoria ambiental dos mais diversos produtos, e a maior aceitação e o uso da ACV dentro das empresas. Por fim, *European Commission, Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Center – EC/JRC/IES* (2010a) cita a publicação *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook*, que entre outros objetivos, permitiu padronizar as diferentes abordagens para promover estudos de ACV visando uma maior comparabilidade de resultados, e servir de suporte para o uso das normas ISO 14040 e 14044;
- **Futuro:** Guinée et al. (2011) analisaram o período de futuro da ACV entre 2010-2020, sendo o principal desafio o desenvolvimento de uma metodologia consensual para a avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida dos produtos (*Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA*). Todavia, autores como Dornfeld et al. (2013) incluíram outros pontos relevantes,

como a necessidade de melhor adequar o uso da ACV para o contexto da melhoria da sustentabilidade dos processos produtivos, i.e., o uso da ACV e de outras técnicas/ferramentas para subsidiar a manufatura sustentável. Já Thorn, Kraus, Parker (2011), Kellens et al. (2012a,b) e Kellens (2013) exaltaram a necessidade de reduzir as incertezas nos dados de inventário utilizados em estudos e em bancos de dados de ACV, pois muitas vezes esses dados se mostram demasiadamente desatualizados e agregados em nível de *black-box*.

A gama de aplicação da ACV depende do objetivo e escopo do estudo. Porém, entre as suas principais aplicações ABNT (2009a), EC/JRC/IES (2010a) e UNEP (2003) citam:

- Identificar oportunidades de melhoria no desempenho ambiental de produtos;
- Reduzir custos pela substituição e/ou otimização no uso de materiais;
- Auxiliar no desenvolvimento do *ecodesign*⁸;
- Fornecer detalhado nível de informações aos tomadores de decisão na indústria, nas organizações governamentais e não-governamentais, tendo em vista, o planejamento estratégico, a definição de metas e prioridades, e a adequação a legislação ambiental;
- Selecionar indicadores relevantes de desempenho ambiental; e
- Obter uma rotulagem ambiental, ou elaborar uma declaração ambiental de produto.

Dependendo da aplicação/finalidade, EC/JRC/IES (2010a) distingue os estudos de ACV em três arquétipos: situações-alvo do tipo A, B, e C. A situação A visa fornecer informações para apoio decisório em nível micro, i.e., fornecer informações em nível de processo e produto abrangendo aplicações como: *ecodesign*, comparação de bens ou serviços, análise de pontos fracos de um produto/processo, seleção de indicadores ambientais, desenvolvimento de critérios de rotulagem ambiental, etc. Já a situação-alvo do tipo B, abrange o apoio decisório em nível meso/macro, i.e., seleção de estratégias com consequências em ampla escala que podem afetar não só o sistema de produto estudado, mas também outros setores externos. A situação B envolve aplicações mais globais, do tipo desenvolvimento de políticas públicas (PIP, políticas de produção e consumo sustentável, etc.). Por último, a situação C é tida como uma “contabilização”, sendo o foco a realização de um monitoramento ou quantificação dos aspectos e dos impactos do CVP, sem haver interesse em abordar a tomada de decisões em nível micro ou macro. A situação C envolve aplicações do tipo monitoramento de impactos ambientais de uma nação, região, setor industrial, produto ou grupo de produtos. Para efeito desta tese, foi considerada a **situação-alvo A** durante os estudos de caso que serão apresentados ao longo da seção 4.2.

⁸ *Ecodesign* se refere ao processo de desenvolvimento de produtos integrando ainda na fase de projeto do produto os aspectos ambientais relevantes para a redução da sua carga ambiental (BREZET e HEMEL 1997).

Segundo as normas ISO 14040 e 14044, a ACV é definida como técnica para a “*compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida*” (ABNT, 2009a,b). As entradas incluem a mensuração do consumo de materiais e energia, e as saídas, os fluxos de produtos e coprodutos, e as emissões ao ar, água e solo, entre outros fluxos, os quais irão compor o inventário do ciclo de vida do produto estudado. Tendo consolidado o inventário, os impactos ambientais do CVP são calculados e os *hotspots*⁹ ambientais são identificados, visando a posterior interpretação desses *hotspots* conforme os objetivos do estudo de ACV (EC/JRC/IES, 2010a). A metodologia para aplicação da ACV segue as fases da Figura 14.

Figura 14 – Fases de uma ACV
Fonte: ISO (2006a) e ABNT (2009a)

A seguir, cada fase da ACV será brevemente explicada, sobretudo com foco na sua relação e com a etapa de manufatura de produtos.

2.4.1. Definição de objetivo e escopo

A fase de Definição de Objetivo e Escopo visa em primeiro lugar, definir o objetivo do estudo. Neste momento deve-se declarar a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo e o público alvo (ABNT, 2009a). Para EC/JRC/IES (2010a), a definição do objetivo é essencial, pois orienta a definição de todos os aspectos que irão compor o escopo da ACV.

Tendo definido o objetivo, o segundo passo é definir o escopo. Para ABNT (2009a), no escopo do trabalho se deve claramente declarar:

⁹ *Hotspots* em ACV se remetem aos destaques no CVP estudado, i.e., são os principais aspectos e impactos ambientais, e os processos elementares de maior relevância no estudo conduzido (ILCD, 2010a).

- O sistema de produto a ser estudado;
- As funções do sistema de produto, ou, para estudos comparativos, dos sistemas;
- Unidade funcional;
- Fronteira do sistema;
- Procedimentos de alocação;
- Metodologia de AICV e tipos de impactos;
- Interpretação a ser utilizada;
- Requisitos dos dados;
- Pressupostos;
- Escolha de valores e elementos opcionais;
- Limitações;
- Requisitos de qualidade dos dados;
- Tipo de revisão crítica, se aplicável;
- Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

Para uma melhor compreensão sobre as necessidades que regem a definição do escopo, seus principais elementos são a seguir discutidos.

Sistema de produto a ser estudado

Trata-se do conjunto de processos elementares (ou unidades de processo), com todos os seus fluxos de entrada e de saída (diretos e indiretos), que modela o CVP. Um processo elementar é compreendido como a menor porção do sistema de produto (ABNT, 2009b; ISO, 2006b), o qual está sujeito a diversos tipos de fluxos de entrada, intermediários, e de saída. Os fluxos de entrada, de saída e os fluxos intermediários na Figura 15 podem compreender materiais, energia, produtos intermediários, coprodutos, e produtos finais.

Para a definição do sistema de produto, toma-se como base o CVP, e então são estabelecidas as fronteiras (geográfica, tecnológica, temporal, etc.) para a inclusão/exclusão de etapas e dos fluxos que entram e que saem do sistema, por meio da aplicação de critérios de corte (ABNT, 2009b).

Figura 15 – Exemplo de conjunto de processos elementares que compõem um sistema de produto
Fonte: ABNT (2009b)

Um sistema de produto para EC/JRC/IES (2010a) pode ser do tipo:

- ***Cradle-to-grave***: abordagem do tipo “*do berço ao túmulo*”, que indica que o estudo será completo em termos de sua abrangência frente ao CVP, pois levará em conta processos elementares que representarão todas as etapas mostradas na Figura 13. Há também a variante *cradle-to-cradle* (ou *closed loop production*), que assume a reciclagem, o reuso ou a remanufatura do produto como estratégias de fim de vida ao invés da disposição final;
- ***Cradle-to-gate***: equivale ao termo “*do berço ao portão da fábrica*”, pois considera processos elementares desde as etapas de extração e beneficiamento de recursos naturais, até a manufatura dos produtos intermediários e/ou do produto final;
- ***Gate-to-gate***: significa “*do portão ao portão da fábrica*”, pois considera somente a etapa de manufatura do(s) produto(s) no estudo de ACV;
- ***Gate-to-grave***: assume a abordagem “*do portão da fábrica ao túmulo*”, pois somente assume processos elementares para representar as etapas de distribuição, uso e o fim de vida do produto (disposição em aterro, incineração, reciclagem, remanufatura, etc.).

Thorn, Kraus, Parker (2011) explicam que esta diversidade nas fronteiras do sistema de produto se deve a complexidade e ao grande dispêndio de recursos (financeiro, de tempo, de mão de obra) para se realizar um estudo completo *cradle-to-grave*. Além disso, os autores acrescentam que ao se estudar produtos intermediários, em geral, os estudos tendem a ser do tipo *cradle-to-gate* ou *gate-to-gate*. Já os estudos que se preocupam mais com as estratégias de fim de vida dos produtos podem ser focados somente na perspectiva *gate-to-grave*.

Para EC/JRC/IES (2010a), as fronteiras de um sistema de produto devem ser definidas tomando-se aspectos como a fronteira geográfica, tecnológica, temporal, e o emprego de critérios de corte. Sobre o critério de corte, ABNT (2009a) cita que a função do critério está em auxiliar na decisão sobre quais entradas serão incluídas na avaliação em termos do

inventário de suas cadeias produtivas. Existem diversos tipos de critérios, sendo os principais: o critério de massa, o de energia e o de relevância/significância ambiental.

Em estudos de ACV a prática mais comum segundo Kellens et al. (2012a) e Thorn, Kraus, Parker (2011), ainda está na visualização da etapa de manufatura como um *black-box*, i.e., um conjunto de processos elementares agregados ou um subsistema que represente toda a etapa de manufatura no sistema de produto. A vantagem desta prática está na simplificação do sistema de produto como um todo, pois a etapa de manufatura não é detalhada em nível de operação. Por outro lado, com este pressuposto perdem-se informações relevantes, por exemplo, sobre a origem dos *hotspots* ambientais e de como eles ocorrem na etapa manufatura (DUFLOU; KELLENS; DEWULF, 2011; MURRAY; ZHAO; SUTHERLAND, 2012).

Assim, ao se utilizar a ACV independentemente do tipo de sistema de produto (*cradle-to-grave*, *cradle-to-gate*, etc.), é importante que a etapa de manufatura seja estratificada em nível de operação, e não como um *black-box*. Nessa linha, Overcash, Twomey e Isaacs (2009) e Vijayaraghavan e Helu (2013) defendem que cada processo elementar da etapa de manufatura seja representado pela máquina-ferramenta¹⁰ que realiza cada tipo de operação, acompanhada das suas demais subunidades (e.g., sistema de aquecimento, sistema de refrigeração, etc.). Contudo, tal abordagem torna o estudo de ACV mais complexo, devido ao maior nível de detalhes requerido ao sistema de produto modelado.

Função, unidade funcional e fluxo de referência

Para a definição da função do sistema de produto, ABNT (2009a) e EC/JRC/IES (2010a) citam que se deve levar em conta a finalidade para a qual o produto se destina através do levantamento de suas características de desempenho durante a fase de uso.

A unidade funcional (UF) deve ser definida com base na função a qual o produto se propõe a cumprir. Ela é estabelecida para fornecer uma base de referência em relação à qual os dados de entrada e saída inventariados para cada processo elementar serão normalizados num sentido matemático, sendo essencial que a mesma seja mensurável. Em outras palavras, EC/JRC/IES (2010a) cita que a UF quantifica e qualifica a função definida para o sistema de produto, sendo necessário para tanto, o conhecimento sobre aspectos técnicos do produto.

Definida a UF também deve ser estabelecido um fluxo de referência (FR), o qual mede a quantidade de produto necessário para cumprir a função expressa pela UF. O Quadro 1 mostra exemplos de função, unidade funcional e de fluxo de referência.

¹⁰ Máquina-ferramenta é uma máquina ou equipamento mecânico utilizado na fabricação de produtos de diversos materiais (metais, plásticos, cerâmicas, madeira, etc.), por meio de algum tipo de operação (GROOVER, 2007). Exemplos de máquinas-ferramentas são tornos, fresadoras, prensas, retificadoras, furadeiras, aplainadoras.

Produto	Função	Unidade funcional	Fluxo de referência	Fonte
Álcool combustível	Servir de combustível em veículos para transporte	Percurso de 10.000 km	1t de álcool combustível	Ometto, Hauschild e Roma (2009)
Fertilizante nitrogenado - ureia	Fornecer uma quantidade de nitrogênio para fertilização do solo	1 t do nutriente N	2,17 t de ureia	Ribeiro (2009)
Painel de madeira aglomerada	Produto intermediário, base para produção de móveis de madeira.	1 m³ de painel	1 m³ de painel	Silva et al. (2013b)

Quadro 1– Exemplos de função, UF e de FR em estudos de ACV

Fonte: elaborado pelo autor

Para ABNT (2009a) comparações entre produtos via ACV só podem ser feitas para sistemas de produto definidos com base nas mesmas condições iniciais, ou seja, mesma função, quantificada por uma mesma UF. No Quadro 1, o último caso apresentado trata-se de uma ACV para um produto intermediário e não final, logo a UF foi igual ao próprio FR.

Nas normas de ACV consta que a técnica além de poder ser utilizada para a avaliação do CVP, também pode ser aplicada para a avaliação de **atividades produtivas**. Contudo, em se tratando de processos de manufatura, Kellens et al. (2012a) introduziram a ideia de que a definição do FR deveria ser padronizado para a referência:

1 segundo de tempo de produção incluindo os diversos modos de operação do processo de manufatura (modo de iniciação, modo de produção parcial/plena, modo de espera, modo de desligamento, etc.) para certo tipo de material processado/produto e para o padrão de trabalho de 2000 horas/ano (250 dias úteis, e turnos de trabalho de 8 horas/dia).

A justificativa dos autores é que assumindo o FR de **1 segundo** é possível gerar dados de inventário padronizados para uma referência universal e com menor nível de incertezas quando comparados aos dados atuais disponíveis nos bancos de dados de ACV. Além disso, quando referenciados os fluxos de entrada e de saída em função do tempo de produção e dos seus diferentes modos de operação (e.g., iniciação, *stand-by*, desligamento, etc.), é possível ter noção sobre a produtividade do processo estudado (KELLENS et al., 2012a). Para tanto, Kellens et al. (2012a) indicaram a necessidade prévia de um **Estudo do Tempo de Produção** para a definição dos diferentes modos de operação existentes no processo de interesse.

No Quadro 2, há exemplos de função, UF, e FR estabelecidos conforme a metodologia proposta por Kellens et al. (2012a) para diferentes processos de manufatura.

Processo de manufatura	Função	Unidade funcional	Fluxo de referência	Fonte
Usinagem à lazer	Remover uma certa quantidade de material	Remoção de 0,40 m de aço St. 37-2, com espessura de 1 mm, e a uma velocidade de 24 m/min.	1 s de processamento para os modo de operação: iniciação, produção plena (5 kW), parcial (1 kW e 2,5 kW), <i>stand-by</i> e modo de desligamento.	Kellens et al. (2012b)
Processo de furação mecânica	Produzir um furo com certo diâmetro numa peça	Produzir 4 furos numa chapa metálica (100 x 100) mm, cada furo com 19,1 mm de diâmetro, à uma velocidade de 111 mm/min.	1 s de processamento para os modos de operação: iniciação, produção plena, e desligamento.	Kellens et al. (2012b)
Usinagem por retificação de mergulho	Remover uma certa quantidade de material	Remoção de 5,82 g de metal SAE 4140 de uma peça cilíndrica com diâmetro de 28 mm.	1 s de processamento para os modos de operação: iniciação, aquecimento, <i>stand-by</i> , dressagem, produção plena, resfriamento.	Filleti et al. (2014)

Quadro 2– Exemplos de função, UF e de FR para estudos de ACV com foco em processos de manufatura

Fonte: elaborado pelo autor

Contudo, a metodologia proposta por Kellens et al. (2012a) apresenta limitações, tais como: 1) a definição do sistema de produto se concentra somente num único processo de manufatura isolado; 2) não há relação do processo de manufatura com o produto final, logo não é possível utilizar a metodologia, por exemplo, visando a melhoria ambiental do CVP; 3) para o processo de manufatura escolhido, são inventariados somente seus fluxos diretos desconsiderando os fluxos indiretos; 4) apesar da metodologia se basear na ACV, as etapas de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e de Interpretação não foram incluídas. Assim, a metodologia proposta por Kellens et al. (2012a) foi incluída nesta tese, mas, tendo em vista meios para superar essas limitações.

Utilizando o FR de 1 segundo de processamento proposto por Kellens et al. (2012a), Silva et al. (2015a) concluíram que esta escolha do valor do FR pode afetar significativamente os resultados de uma ACV para processos de manufatura. Silva et al. (2015a) estudaram um processo de retificação de uma peça cilíndrica feita de Inconel 751, e compararam os resultados utilizando duas premissas para o valor do FR: 1 segundo de processamento vs. 20.000 mm³ de material removido (ou a usinagem completa de uma peça). Como ferramenta auxiliar, os autores aplicaram uma Análise de Variância (ANOVA) sobre os resultados da ACV no intuito de estudar a influência dos parâmetros de processo (taxa de remoção de

material e tipo de rebolo de usinagem) sobre os impactos potenciais calculados. Os resultados comparativos apontaram que para o FR de 1 segundo, no geral, os parâmetros de processo não apresentaram influência significativa sobre os impactos do ciclo de vida da peça usinada. Já para o FR foi 20.000 mm³, a conclusão foi contrária, i.e., os parâmetros de processo escolhidos foram significativos sobre os impactos potenciais. Como o tempo padrão de 1 segundo proposto por Kellens et al. (2012a) não se remete a UF da forma como um estudo de ACV requer, tal abordagem foi evitada nesta tese, conforme será discutido na seção 4.1.2.

Procedimentos de alocação

A alocação é empregada para sistemas multifuncionais que apresentam mais de um produto como saída principal (ABNT, 2009a,b). Por exemplo, para a ACV do álcool combustível pode ser feita alocação para resolver a multifuncionalidade, pois o sistema de produto pode produzir além do álcool combustível, outros produtos, como o açúcar e a energia elétrica pela cogeração do bagaço da cana (OMETTO; HAUSCHILD; ROMA, 2009).

Contudo, ABNT (2009a) e EC/JRC/IES (2010a) citam que sempre quando possível, a alocação deve ser evitada. Para isso, o problema da multifuncionalidade pode ser resolvido por meio de abordagens alternativas como:

- **Subdivisão de processos multifuncionais *black-box*:** os processos elementares multifuncionais classificados como *black-box* são subdivididos em processos elementares monofuncionais, liberando assim os processos efetivamente necessários e relacionados ao produto de interesse. Todavia, a subdivisão só pode aplicada quando os processos elementares separados não são também multifuncionais;
- **Expansão do sistema:** é mais utilizado quando é preciso tornar vários sistemas multifuncionais comparáveis entre si. No caso, as fronteiras do sistema são expandidas e acrescentadas as funções ausentes e os inventários dos respectivos produtos monofuncionais;
- **Substituição do sistema:** trata-se de uma variante da abordagem de expansão do sistema. Porém, aqui a multifuncionalidade é resolvida expandindo as fronteiras do sistema de produto e subtraindo a função não necessária por uma maneira alternativa de fornecê-la. Assim, a substituição significa subtrair o inventário de outro sistema do sistema analisado.

Em último caso, como alternativa as abordagens supracitadas, adota-se a **alocação**. A alocação é feita através da distribuição proporcional dos fluxos de entrada e de saída de um processo ou sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto (ABNT, 2009a). Para isso, a alocação deve estar baseada em fatores/critérios específicos, como propriedades

físicas (por exemplo, massa ou energia), critérios econômicos (valores de mercado de produtos e insumos), ou integrando mais de um dos tipos de fatores de alocação.

Requisitos de qualidade dos dados

Este item da definição de objetivo e escopo serve para especificar as características dos dados necessários ao estudo, devendo abranger segundo ABNT (2009a):

- **Cobertura temporal:** idade dos dados e período mínimo de tempo para que ocorra a coleta;
- **Cobertura geográfica:** área a partir da qual os dados devem ser coletados;
- **Cobertura tecnológica:** tecnologia específica ou conjunto de tecnologias. Por exemplo, se o estudo se baseia no *mix* tecnológico empregado para o sistema de produto estudado, ou se considerada a melhor tecnologia disponível, ou se a tecnologia convencional, etc.;
- **Fontes dos dados:** diz respeito se os dados a serem coletados durante o inventário serão de fontes primárias ou secundárias. Os **dados primários**, em geral, são obtidos via amostragem direta para cada processo elementar, consulta de registros de consumo de recursos e emissões, consulta de especificações técnicas de insumos, e cálculo direto mediante conversões de dados (*THE GREEN GRID*, 2012). Já os **dados secundários**, em geral, são obtidos via revisão de literatura pertinente e utilização de bancos de dados e softwares de ACV (*THE GREEN GRID*, 2012). Outra característica importante sobre a fonte dos dados se remete aos **fluxos diretos** e **indiretos**. Os fluxos diretos são aqueles diretamente relacionados aos processos elementares que constituem o sistema de produto, à exemplo dos fluxos de entrada, de saída e os fluxos intermediários esquematizados na Figura 15. Já os fluxos indiretos dizem respeito aos fluxos a montante e a jusante associados aos fluxos diretos. Um exemplo de fluxo direto pode ser o consumo de energia elétrica nos processos elementares da etapa de manufatura, enquanto que os fluxos indiretos podem ser o consumo de recursos energéticos primários para a geração da eletricidade, como os combustíveis fósseis e a biomassa. Como explicado em *The Green Grid* (2012), em geral, os fluxos indiretos são obtidos via softwares e bancos de dados de ACV, como será discutido na seção 2.4.3;
- **Outros requisitos:** conforme o nível de detalhes requerido ao estudo, podem ainda ser contemplados itens como a precisão, completeza, representatividade dos dados, consistência, reprodutibilidade, e as incertezas dos dados.

Pressupostos e limitações

Tratam-se das suposições/considerações tomadas para o estudo de ACV. Conforme EC/JRC/IES (2010a) esses pressupostos são baseados nas limitações do estudo, como

ausência de bancos de dados, estabelecimento de cenários, e definições técnicas feitas para todos os níveis, desde o sistema de produto como um todo até as especificidades por processo elementar. Cada pressuposto deve estar embasado em alguma justificativa adequada.

Já nas limitações é onde são esclarecidas todas as restrições do estudo de ACV, se baseando, por exemplo, na falta de dados, restrições dos métodos de avaliação de impactos ambientais, restrições devido ao estabelecimento da fronteira do sistema de produto, etc.

Para o contexto de manufatura de produtos, Duflou, Kellens e Dewulf (2011), Kellens et al. (2012a) e Kellens (2013) sugerem como pressupostos importantes a definição dos parâmetros de processo (temperatura, pressão, velocidade, potência, etc.) relevantes para os processos produtivos que serão analisados. Contudo, os autores somente abordaram a listagem desses parâmetros, e não os relacionaram com os aspectos e impactos ambientais no CVP – lembrando que como foi discutido na seção 2.3, os **parâmetros de processo** e os **RTQP** podem afetar na magnitude dos impactos ambientais do CVP.

2.4.2. Análise de inventário do ciclo de vida

Para EC/JRC/IES (2010a) os dois princípios fundamentais da análise de inventário do ciclo de vida (ICV) são as modelagens atribucional e consequencial, sendo que:

- **Modelagem atribucional:** o sistema existente é incorporado a uma tecnosfera¹¹ estática, sendo que a modelagem faz uso de dados históricos, mensuráveis, e baseados em fatos reais, portanto, o sistema a montante e a jusante do CVP é modelado como ele é ou era (ou como se prevê que será). Este tipo de modelagem é frequentemente utilizado em estudos envolvendo as situações de referência A e C apresentadas por EC/JRC/IES (2010a);
- **Modelagem consequencial:** o sistema existente é incorporado a uma tecnosfera dinâmica, sendo que a modelagem faz uso de dados marginais para o ICV, baseados em uma cadeia de abastecimento genérica, com intuito de analisar as consequências que uma decisão no sistema de produto analisado pode acarretar em outros processos e sistemas da economia. Nesta modelagem se analisa como que alterações diretas e indiretas na oferta e demanda do produto estudado podem causar alterações na demanda e oferta de outros produtos. Este tipo de modelagem se destaca nas situações-alvo B e C de EC/JRC/IES (2010a).

Independente se o modelo é atribucional ou consequencial, o ICV é a etapa que consiste na coleta de dados, o estabelecimento dos procedimentos de cálculo e a quantificação dos fluxos de entrada e de saída no CVP (ABNT, 2009b), como esquematizado na Figura 16.

¹¹ Tecnosfera é a parte do planeta (ou biosfera) constituída por sistemas nos quais ocorrem transformações humanas para a fabricação de produtos (EC/JRC/ES, 2010a).

O inventário deve ser estabelecido de modo a assegurar que os fluxos de entrada e de saída estejam padronizados a partir da UF. Das quatro fases que constituem a ACV, a construção do ICV é considerada a de maior complexidade (EC/JRC/IES, 2010a).

Figura 16 – Procedimentos simplificados para o ICV
Fonte: ABNT (2009a)

ABNT (2009b) resume as atividades mostradas na Figura 16 em três grupos, sendo:

- **Coleta de dados:** é a tarefa de maior nível de dificuldades durante o ICV. Esta etapa envolve a coleta dos fluxos diretos e indiretos associados a cada processo elementar. Sobre os fluxos indiretos, eles podem ser obtidos mediante o uso de bancos de dados e softwares de ACV, conforme a lista de opções do Quadro 3. Entre os softwares de ACV mais utilizados no mundo, Cherubini e Ribeiro (2015) destacam: **SimaPro**, **GaBi**, **Umberto**, e **OpenLCA**;

- **Cálculos com os dados:** em seguida aplicam-se procedimentos de cálculo para o tratamento dos dados, objetivando a validação dos dados coletados, a correlação dos dados aos processos elementares definidos, e a agregação dos dados;
- **Alocação de fluxos e liberações:** visa aplicar os procedimentos de alocação conforme as definições tomadas no escopo do estudo. A alocação e a abordagem de subdivisão são os métodos correspondentes na modelagem atribucional, enquanto que as abordagens de expansão do sistema e substituição são utilizadas na modelagem consequential para resolver a multifuncionalidade (EC/JRC/IES, 2010a).

Para o ICV de processos de manufatura, atualmente há uma demanda para que os dados sejam coletados de modo desagregado, em nível de operação de manufatura. Kellens et al. (2012a,b) ressaltam a necessidade de se coletar esses dados tendo em conta os diversos modos de operação e as subunidades dos processos de manufatura. Com isso, torna-se possível gerar dados de ICV com melhor qualidade, especialmente visando sua disponibilização nos bancos de dados de ACV mostrados no Quadro 3.

O Quadro 3 lista ao todo 16 bancos de dados, incluindo o SICV Brasil referente ao banco de dados nacional para o ICV de produtos brasileiros. A maioria dos bancos de dados acessados são europeus. Ao todo dez bancos de dados foram classificados como de acesso gratuito, e seis são de acesso restrito. Os bancos de dados de acesso restrito, em geral, requerem que seja realizada a compra de licença específica de uso. Já os bancos gratuitos, em geral, somente solicitam um cadastro de usuário e o aceite dos termos de uso do mesmo.

A maior parte desses bancos de dados foram publicados após a década de 2000, sendo que o número de ICVs publicados pode superar os 10.000, como ocorre para o **ecoinvent** e **GaBi**. O SICV Brasil foi publicado em 2016, e é gerenciado pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT (SILVA; MASONI, 2016). Todos os bancos de dados do Quadro 3 utilizam como referências os requisitos das normas ISO 14040 e 14044, e além disso, também se destaca a utilização do documento *ILCD Handbook* (EC/JRC/IES, 2010a) como referência complementar.

Tendo concluído o ICV, o inventário consolidado constitui de base para fase seguinte de avaliação dos impactos ambientais do CVP.

País de origem	Nome do banco de dados	Acesso gratuito ou restrito?	Site de acesso
Alemanha	<i>Ökobau.dat database</i>	Gratuito	http://www.oekobaudat.de/
	<i>GaBi database</i>	Restrito	http://www.gabi-software.com/international/index/
Austrália	<i>AusLCI – The Australian Life Cycle Inventory Database Initiative</i>	Gratuito	http://alcas.asn.au/AusLCI/
Brasil	SICV Brasil – Sistema de Inventário do Ciclo de Vida do Brasil	Gratuito	http://sicv.acv.ibict.br/
Canadá	<i>CRMD – Canadian Raw Materials Database</i>	Gratuito	http://crmd.uwaterloo.ca/eng.html
	<i>LCI BD-Quebec – CIRAIG Quebec LCI database</i>	Restrito	http://www.ciraig.org/fr/bd-icv.php
China	<i>CLCD – Chinese Life Cycle Database</i>	Restrito	http://www.ike-global.com/archives/1094.html
Estados Unidos	<i>USLCI – U.S. Life Cycle Inventory Database</i>	Gratuito	http://www.nrel.gov/lci/
Itália	<i>Italian National Life Cycle Inventory Database</i>	Gratuito	http://lci-ilcd.bologna.enea.it:8080/Node/
Japão	<i>IDEA – Inventory Database for Environmental Analysis</i>	Restrito	http://idea-lca.jp/index.html
Malásia	<i>MY-LCID – The Malaysia Life Cycle Inventory Database</i>	Restrito	http://mylcid.sirim.my/sirimlca/
Tailândia	<i>ThaiLCI DB – Thai National Life Cycle Inventory Database</i>	Gratuito	http://www.thailcidatabase.net
União Europeia	<i>ELCD – European Reference Life-Cycle Database</i>	Gratuito	http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/index.xhtml
Suécia	<i>CPM LCA Database</i>	Gratuito	http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/
Suíça	<i>Ecoinvent – Swiss Centre for Life Cycle Inventories</i>	Restrito	http://www.ecoinvent.org/
Sul da Europa	<i>LCADB.sudoe</i>	Gratuito	http://lcadb.sudoe.ecotech.cat/

Quadro 3– Principais bancos de dados para apoio a ACV

Fonte: Adaptado de Cherubini e Ribeiro (2015) e Silva e Masoni (2016)

2.4.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida

A avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) objetiva classificar e conhecer a magnitude e a significância dos impactos ambientais potenciais para cada item inventariado em cada processo elementar (ABNT, 2009a,b), conforme as atividades da Figura 17.

Figura 17 – Elementos obrigatórios e opcionais que constituem a fase de AICV

Fonte: ABNT (2009b)

A seguir cada elemento obrigatório da AICV é descrito.

- **Seleção:** consiste na seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização. Em geral, selecionam-se primeiramente as categorias de impacto, e os dois itens restantes são automaticamente selecionados quando se escolhe o método de AICV. As categorias de impacto representam classes de problemas ambientais que podem ser agravados pelos aspectos ambientais do produto em estudo (EC/JRC/IES, 2010a). No Quadro 4, é apresentada uma lista com alguns dos principais métodos de AICV existentes;
- **Classificação:** correlacionam-se as cargas ambientais de inventário com as diferentes categorias de impacto selecionadas na etapa antecedente. Os resultados de ICV podem ser correlacionados a uma ou mais categorias de impacto;

- **Caracterização:** envolve a conversão dos resultados de ICV para unidades comuns (indicadores de categoria) e a agregação dos resultados convertidos dentro de cada categoria de impacto (ABNT, 2009a). A etapa de caracterização é feita mediante o uso de fatores de caracterização (ou equivalência), os quais foram desenvolvidos de acordo com as propriedades das substâncias e as escalas de abrangência espacial (local, regional ou global) dos efeitos dos impactos. Dependendo do método de AICV escolhido, variações nos resultados dos indicadores de categoria podem ocorrer, por causa das diferenças entre os fatores de caracterização e devida à origem de cada método (GUINÉE et al., 2011).

Método de AICV	Referência	Categorias de impacto incluídas								
		PA	PAG	PDCO	PDR	PE	PEC	PFFO	PRI	PTH
CML 2001	Guinée (2001)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
EDIP 1997	Wenzel, Hauschild e Alting (1997)	X	X	X	X	X	X	X		X
EDIP 2003	Hauschild e Potting (2005)	X	X	X	X	X	X	X		X
Eco-indicator99	Goedkoop et al. (2000)		X	X	X		X		X	X
Ecological Scarcity 2006	Frischknecht et al. (2009)	X	X	X	X	X	X			X
EPD	EPD (2008)	X	X	X				X		X
EPS 2000	Steen (1999)	X			X	X				X
ILCD/PEF recommendation	EC/JRC/IES (2010b)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IPCC	IPCC (2007)		X							
IMPACT 2002+	Jolliet et al. (2003)	X	X	X		X	X	X	X	
LCA nets	Sampattagul et al. (2003)	X	X	X	X					X
LIME	Itsubo e Inaba (2003)	X	X	X	X	X	X	X		X
LUCAS	Toffoletto et al. (2007)	X	X	X	X	X	X	X		X
ReCiPe	Goedkoop et al. (2009)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TRACI	Bare et al. (2003)	X	X	X		X	X	X		X
USETox	Rosenbaum et al. (2008)						X			X

Quadro 4 – Principais métodos de AICV por categoria de impacto ambiental

Fonte: elaborado pelo autor

Sobre o Quadro 4, Carvalho et al. (2014) e Cherubini e Ribeiro (2015) destacam as seguintes categorias de impacto: Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (PDCO), Potencial de Depleção de Recursos (PDR), Potencial de Ecotoxicidade (PEC), Potencial de Formação de Fotoquímica de Ozônio (PFFO), Potencial de Radiação Ionizante (PRI), e Potencial de Toxicidade Humana (PTH). Há métodos que consideram impactos ambientais globais (EDIP 1997, USETox), outros que foram desenvolvidos para o contexto europeu (CML 2001, EDIP 2003, Eco-indicator99, ILCD/PEF recommendation, ReCiPe), e outros relativos a regiões específicas, a exemplo do Canadá (LUCAS), Japão (LIME) e Estados Unidos (TRACI). Outra característica é que há métodos do tipo *midpoint* (ponto intermediário) e *endpoint* (ponto final). Segundo EC/JRC/IES (2010a), os métodos *midpoint* (CML 2001, EDIP 1997, EDIP 2003, ILCD/PEF recommendation, TRACI, USETox) se limitam à modelagem quantitativa antes do fim do caminho do impacto; já os métodos *endpoint* (Eco-indicator99, EPS 2000), correlacionam os aspectos ambientais do ICV diretamente com os danos finais, como: prejuízos à saúde humana (incidência de doenças cancerígenas e não cancerígenas), danos à qualidade do ecossistema, ou ameaça de extinção de espécies. Há também métodos híbridos (*midpoint* e *endpoint*), como é o caso do LIME, IMPACT 2002+, e ReCiPe.

Diversos autores destacam que não há um consenso sobre a escolha do melhor método de AICV. Recomenda-se utilizar métodos desenvolvidos para o contexto geográfico do estudo, e considerando todas as categorias de impacto disponíveis no método selecionado (CARVALHO et al., 2014; HAUSCHILD et al., 2013). Para o caso do Brasil, a utilização de metodologias desenvolvidas para outros contextos regionais, principalmente europeus, ainda é prática corrente tendo em vista que ainda não há nenhuma metodologia de AICV desenvolvida ou adaptada ao contexto brasileiro (BUENO et al., 2012; SILVA, 2012).

Tendo abordadas as etapas obrigatórias de uma AICV, em muitos casos, isto encerra a AICV. Entretanto, existem ainda os elementos opcionais que segundo ABNT (2009a) são a normalização, o agrupamento e a ponderação, mostrados também na Figura 17.

- **Normalização:** pela normalização os resultados dos indicadores de categoria são relacionados a uma situação de referência, todos numa mesma unidade, fornecendo informações sobre suas significâncias relativas (ABNT, 2009a; ISO, 2006a). O intuito de normalizar os resultados está em permitir a conversão dos indicadores de impacto numa única base de referência, afim de que possam ser comparados;
- **Agrupamento:** agregação e possível hierarquização das categorias de impacto (ABNT, 2009a). Os resultados caracterizados e normalizados podem ser ordenados em um ou mais conjuntos, podendo, por exemplo, fazer referência à escala espacial das categorias (global, regional, nacional) ou a uma classificação, por exemplo, prioridade alta, média, baixa;

- **Ponderação:** é a conversão dos resultados dos indicadores de categorias de impacto por meio do uso de fatores numéricos baseados em escolhas de valores (ABNT, 2009a). A cada categoria de impacto pode ser atribuído um peso (fator de ponderação) destacando sua importância em relação às demais. Por exemplo, os métodos CML 2001, Eco-indicator99, EDIP 1997, e ReCiPe 2008, disponibilizam além dos fatores de equivalência, diversos fatores de ponderação e de normalização para as categorias de impacto que consideram.

No contexto de avaliação de impactos ambientais de processos de manufatura, há uma clara tendência de somente se analisar o consumo de energia elétrica e de seus efeitos para a categoria de PAG, como será discutido em detalhes na seção 4.1.1 Corroborando, Filleti et al. (2014), e Silva, Ometto e Silva (2016) destacam que a exceção do PAG, a maioria dos estudos de *green manufacturing* não consideram os impactos ambientais para as demais categorias do Quadro 4. Isto se mostra uma limitação, principalmente visando melhorar ambientalmente os processos produtivos e o CVP. Afinal, parte-se de um pressuposto de que o consumo de eletricidade e a categoria de PAG são os principais *hotspots*. Porém, esta constatação não pode ser evidenciada sem antes de ter sido feito um estudo de ACV completo incluindo outras categorias de impacto (e.g., PE, PDR, PTH, etc.) e outros aspectos ambientais envolvidos (e.g., consumo de materiais e emissões ao ar, água e solo).

2.4.4. Interpretação

A última fase da ACV é a Interpretação, onde é feita a identificação e análise dos resultados obtidos durante o ICV e AICV de acordo com o objetivo e o escopo traçados (EC/JRC/IES, 2010a). São tomadas as conclusões, recomendações e limitações do estudo, devendo ser desenvolvidas prioridades e feitas avaliações para a identificação de oportunidades para a redução do ônus ambiental (ABNT, 2009a,b). Podem ser destacadas iniciativas para a minimização do uso de materiais/energia ou de processos conhecidos por causar os *hotspots* levantados (GUINÉE et al., 2011; THORN, KRAUS, PARKER, 2011).

No âmbito de manufatura de produtos, deve-se empenhar na adoção de estratégias que permitam a redução, reutilização, reciclagem e recuperação de resíduos, e a redução no uso intensivo de materiais e de energia (DORNFELD et al., 2013; SILVA; OMETTO; SILVA, 2016), conforme os principais impactos dos processos estudados. A realização dessas iniciativas é o que caracteriza a aplicação do conceito de *green manufacturing*.

Por fim, como discutido ao longo da seção 2.4.3, muitos estudos de *green manufacturing* já predefinem o consumo de eletricidade e os impactos para o PAG como *hotspots* a serem estudados. Assim, a realização da etapa de Interpretação da ACV muitas

vezes pode estar comprometida. Afinal, as sugestões de melhorias propostas nesses casos não foram embasadas num estudo completo do CVP, e tão pouco, se levaram em conta outros aspectos ambientais os quais os processos produtivos poderiam estar sujeitos (e.g., consumo de água, lubrificantes, fluido de corte, etc.) (VIJAYARAGHAVAN; HELU, 2013).

2.5. Green manufacturing

No objetivo de evitar e/ou minimizar os impactos ambientais da manufatura devido ao uso intensivo de materiais e energia, e as emissões que poluam o ar, água e solo, várias estratégias de gestão ambiental são verificadas, conforme mostra a Figura 18.

Na Figura 18, as estratégias de gestão ambiental podem ser organizadas em prioridades, no formato de uma “escada”, onde no seu topo encontram-se as medidas proativas de gestão, e na sua base, as medidas reativas/corretivas. Também, verifica-se que quanto mais no topo da escada, melhor deverá ser o desempenho econômico e ambiental (ou ecoeficiência), pois o foco estará no grupo de medidas proativas, o que evita custos adicionais com reciclagem, tratamento e disposição final de resíduos, e os consequentes impactos ambientais relacionados a estas medidas corretivas (BARBIERI, 2007; NAZAROFF; COHEN, 2001; UNEP, 2007).

Figura 18 – Estratégias de gestão ambiental
Fonte: Adaptado de Nazaroff e Cohen (2001) e UNEP (2007)

No grupo de medidas proativas de gestão ambiental, têm-se as estratégias de:

- **Não geração:** é evitar, prevenir ou não permitir a geração de resíduos por meio da melhoria ambiental de processos de manufatura e de produtos (NAZAROFF; COHEN, 2001). É a principal estratégia a ser adotada para se obter os melhores resultados de ecoeficiência

industrial. Jacquemin, Pontalier e Sablayrolles (2012), e UNEP (2007) citam que esta estratégia passou a ter maior espaço somente a partir do início da década de 1990, para Silva et al. (2013a) devido a grande quantidade de estudos envolvendo a metodologia de P+L, e mais tarde, para Guinée et al. (2011) com a ascensão da ACV no início da década de 2000;

- **Minimização:** trata-se da redução da geração de resíduos na fonte geradora. Depois da estratégia de **não geração**, esta deve ser a próxima prioridade (NAZAROFF; COHEN, 2001).

Já o grupo das medidas reativas de gestão ambiental envolve:

- **Reciclagem interna:** é a reutilização ou o reuso de resíduos para dentro do processo produtivo, ou seja, trata-se da produção em ciclo fechado. Trata-se de uma estratégia para se poupar o consumo de recursos e assim, reduzir custos (NAZAROFF; COHEN, 2001). Em contrapartida, esta medida que pode gerar custos extras à empresa, pois se exige a gestão adequada dos resíduos a serem reaproveitados, e, além disso, pode requerer o emprego de processos produtivos que consumam muita energia e que sejam pouco eficientes;
- **Reciclagem externa:** é a recuperação de resíduos gerados no processo produtivo para utilização como fonte de matéria prima para outras indústrias. Todavia, assim como a **reciclagem interna**, trata-se de uma medida reativa, uma vez que os resíduos continuam sendo gerados (BRAGA et al., 2011; NAZAROFF; COHEN, 2001). Iniciativas de reciclagem tanto interna quanto externa ganharam espaço principalmente em meados da década de 1980 (JACQUEMIN; PONTALIER; SABLAYROLLES, 2012; UNEP, 2007);
- **Tratamento:** esta estratégia é conhecida também como controle ambiental na saída, tais como nas chaminés industriais e nas redes de esgoto (BRAGA et al., 2011). Envolve a aplicação de técnicas e de tecnologias que não evitam a geração dos resíduos, mas que permitem o seu tratamento para redução da quantidade de poluentes emitidos ao meio ambiente (BRAGA et al., 2011; CURI, 2012). Como exemplos de tratamento de resíduos tem-se a instalação de equipamentos para a coleta de emissões de chaminés, as estações de tratamento de efluentes líquidos, e a compostagem de resíduos sólidos. Esta estratégia perpetuou principalmente durante as décadas de 1970 e 1980 (UNEP, 2007);
- **Disposição final:** esta é a última estratégia indicada na Figura 18. Trata-se de realizar a destinação de resíduos gerados para áreas externas à empresa e ao processo gerador do resíduo (BRAGA et al., 2011). Curi (2012) explica que esta foi a principal estratégia até início da década de 1970, pois não havia intensa pressão da sociedade para com os desastres ambientais, e tão pouco demanda por uma gestão ambiental proativa dos resíduos.

Assim, para uma redução substancial dos impactos ambientais relacionados às atividades de manufatura, devem ser priorizadas as **estratégias proativas** de gestão

ambiental. Para tanto, *Sustainable Manufacturing Initiative* (2011) destaca o conceito de **Green Manufacturing (GM)**, conforme esquematizado na Figura 19.

A partir da Figura 19, verifica-se que a visão sobre o conceito de *GM* tem evoluído conforme a evolução das estratégias de gestão ambiental. No início, havia as soluções de fim de tubo, passando depois pela produção em ciclo fechado, a P+L, a ecoeficiência industrial, evoluindo até os dias atuais, onde a *GM* passa a ser integrada junto à visão de CVP.

Figura 19 – Evolução da visão de *GM* conforme as diferentes estratégias de gestão ambiental
Fonte: Adaptado de Silva, Ometto e Silva (2016), e *Sustainable Manufacturing Initiative* (2011)

Para diversos autores como Araújo (2010), Deif (2011), OECD DSTI (2011), Rusinko (2007), e Silva e Amaral (2009), a *GM* é alcançada por meio da P+L, pois ela tem foco sobre o processo produtivo, e permite o aumento da eficiência no uso dos recursos naturais e a minimização na geração de resíduos, resultando numa melhor ecoeficiência. Rusinko (2007) enfatiza o termo *GM* como resultado de um estudo de caso numa indústria de tapetes, onde por meio da P+L foi possível melhorar ambientalmente os processos de fabricação analisados. Despeisse et al. (2012a) propõe uma metodologia de *GM* tomando como base as etapas de aplicação da P+L. Outros autores, como Bergmiller (2006), Florida (1996), King e Lenox

(2001), e Pampanelli, Found e Bernardes (2013) relacionaram a *GM* com a P+L e com o *Lean Manufacturing*¹². Contudo, todos esses estudos não integraram a visão de CVP.

A inserção da visão de CVP para subsidiar a *GM* é recente, e tem ocorrido por meio do relacionamento do conceito de *GM* principalmente ao uso da técnica de ACV (DORNFELD, 2014; MURRAY; ZHAO; SUTHERLAND; 2012). Todavia, esta integração apresenta limitações como as que já foram discutidas durante as seções 2.4.1 a 2.4.4. Além daquelas, há outras barreiras na adoção da *GM*, conforme será abordado na seção 2.5.3.

Por sua relevância no contexto de *GM*, na Figura 20 é realizada uma distinção entre P+L e ACV, afinal elas se destacam em se tratando da adoção de estratégias proativas de gestão ambiental na indústria. Todavia, enquanto que a P+L foca somente sobre o processo produtivo, a ACV tem foco sobre a função do produto (EC/JRC/IES, 2010a).

Figura 20 – Foco e etapas de aplicação da P+L e da ACV
Fonte: elaborado pelo autor

Pela Figura 20, em geral, a metodologia de P+L segue o ciclo *PDCA* (*Plan Do Check Action*) contando com etapas desde o planejamento das atividades (incluindo sensibilização de funcionários), a coleta de dados, a análise de resultados, a proposição de melhorias

¹² *Lean manufacturing* ou manufatura enxuta é uma filosofia proveniente do Sistema Toyota de Produção, surgido na década de 1950, no Japão, e que consiste em analisar o fluxo de produção ao longo do tempo e minimizar o desperdício de tempo e de recursos na manufatura (BHASIN e BURCHER, 2006).

ambientais, a implementação das sugestões e a melhoria continuada do programa de P+L (SILVA et al., 2013a). Já a ACV é normalizada pela série ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a,b) e contempla suas quatro etapas: definição de objetivo e escopo, ICV, AICV e interpretação. Além disso, as etapas para o desenvolvimento de uma ACV não seguem um ciclo fechado e direto como a P+L, pois se trata de um processo iterativo onde em cada etapa as definições/decisões tomadas podem ser redefinidas (ABNT, 2009b).

A etapa de ICV seria equivalente à etapa 2 da P+L na Figura 20. Todavia, no ICV os aspectos ambientais são quantificados para o CVP e não somente para a etapa de manufatura como a P+L adota. Outra diferença crucial entre a P+L e a ACV é que a ACV se mostra mais complexa do que a P+L (DESPEISSE et al. 2012a), afinal, a ACV se preocupa com a quantificação dos aspectos e dos impactos de todo o CVP, enquanto que a P+L se limita somente a análise dos aspectos ambientais de dentro da etapa de manufatura. Por tudo isso, a realização de uma P+L deve demandar menos recursos (e.g., tempo, mão de obra, informações) para sua aplicação comparativamente ao uso da ACV.

2.5.1. O que é *GM*?

O conceito de *GM* pode ser entendido como parte de um conceito mais amplo, o *sustainable manufacturing* (ou **manufatura sustentável**), definido como:

A manufatura de produtos utilizando materiais e processos que minimizem os impactos negativos sobre o meio ambiente, promovendo a conservação de energia e dos recursos naturais, a segurança dos trabalhadores, dos consumidores e da comunidade, e que se mostra economicamente viável (U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 2010).

A manufatura sustentável se remete ao conceito de desenvolvimento sustentável proposto pelo UN-WCED (1987), porém, aplicado ao contexto da indústria de manufatura. Enquanto isso, a *GM* se preocupa com os impactos ambientais da manufatura, o que para Garetti e Taisch (2012) é crucial rumo ao desenvolvimento sustentável como um todo.

O adjetivo “*green*” é utilizado normalmente para se referir à questão da preservação da qualidade do meio ambiente, e quando relacionado ao termo “*manufacturing*”, gera-se a ideia de reduzir impactos ambientais na manufatura. O termo *GM* também é referenciado na literatura por outras expressões, tais como: *environmentally conscious manufacturing* – ECM (FLORIDA, 1996; GUNGOR; GUPTA, 1999; ILGIN; GUPTA, 2010; MITTAL; SANGWAN, 2011; SARKIS, 1999; YAN; FEI; JINLIANG, 2008), *environmentally benign manufacturing* – EBM (ALLEN et al. 2002; BILES, 2007; SEIDEL et al. 2009; GUTOWSKI

et al. 2005), *environmentally responsible manufacturing* – ERM (CURKOVIC, 2003), e *eco-friendly manufacturing* (KIM et al., 2013). Uma lista cronológica com as diversas definições de *GM* e de seus equivalentes segue no Quadro 5.

Definições de <i>GM</i>	
1	ECM é uma evolução das práticas de <i>lean manufacturing</i> voltada para a redução da geração de resíduos na manufatura para a preservação do meio ambiente (FLORIDA, 1996).
2	O ECM é um método para a manufatura de produtos com menor impacto ambiental contando a partir da concepção até o fim de vida dos produtos (GUNGOR e GUPTA, 1999).
3	O ERM pode ser entendido como uma forma de produção integrada que busca a melhoria do desempenho econômico na indústria, e ao mesmo tempo a redução e eliminação de resíduos gerados na manufatura, uso e fim de vida dos produtos (CURKOVIC, 2003).
4	O EBM é um comportamento ambiental proativo da indústria para com o tratamento dos problemas ambientais durante a manufatura dos produtos (GUTOWSKI et al., 2005).
5	EBM consiste em avaliar o dilema de manter o progresso econômico sem comprometer o meio ambiente durante as atividades de manufatura (BILES, 2007).
6	GM é uma abordagem sustentável durante as atividades de projeto e de engenharia no desenvolvimento de produtos e/ou de sistemas de manufatura com menores impactos ambientais (DEIF, 2011).
7	GM é a habilidade do uso consciente dos recursos naturais durante a manufatura preservando o meio ambiente e garantindo a qualidade de vida das pessoas (GARETTI e TAISCH, 2012).
8	A manufatura ambientalmente amigável é um modo de manufatura que permite a gestão e o controle da poluição nos processos de produção (KIM et al., 2013).
9	GM é um método para a manufatura de produtos que minimiza a geração de resíduos e que reduz os impactos ambientais (RAO, 2013).
10	GM é um termo usado para descrever práticas de manufatura que não comprometam o meio ambiente (REHMAN; SHRIVASTAVA; SHRIVASTAVA, 2013).
11	GM é realizar a manufatura de produtos de tal modo que permita a redução e o controle do consumo de recursos e da poluição ambiental no ciclo de vida dos produtos (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY – NIST, 2014).

Quadro 5 – Diferentes definições de *GM* e de suas correlatas

Fonte: elaborado pelo autor

Pelo Quadro 5, verifica-se que dentre as várias definições apresentadas há um consenso em todas elas: **a redução de impactos ambientais seja pela redução no consumo de recursos e/ou pela geração de resíduos**. Por outro lado, tais definições podem variar em termos de sua abrangência, i.e., enquanto algumas focam somente na redução dos impactos em nível de manufatura (e.g., BILES, 2007; FLORIDA, 1996; GARETTI; TAISCH, 2012; GUTOWSKI et al., 2005; KIM et al., 2013; RAO, 2013; REHMAN; SHRIVASTAVA;

SHRIVASTAVA, 2013), outras são mais abrangentes e sugerem a redução dos impactos ambientais do CVP (e.g., GUNGOR; GUPTA, 1999; CURKOVIC, 2003; DEIF, 2011; NIST, 2014). Dentre as definições apresentadas, essas últimas que incluem a visão de CVP foram utilizadas como base para o desenvolvimento desta tese.

Uma explicação a ser feita é sobre a relação entre os conceitos de *GM* e *Lean manufacturing*, pois na literatura muitos estudos tratam ambos como complementares (e.g., BERGMILLER, 2006; FLORIDA, 1996; KING; LENOX, 2001; PAMPANELLI, FOUND BERNARDES, 2013), ainda que tenham objetivos diferentes. Afinal, o *lean* foca na satisfação do cliente, enquanto que o *green* foca sobre a preservação do meio ambiente. Na Figura 21, Jawahir et al. (2006) ilustra e diferencia diversas estratégias de manufatura, incluindo o *lean* e o *green manufacturing*.

Pela Figura 21 o conceito de *GM* surgiu em meados da década de 1990 como uma evolução do *lean manufacturing*, e serve de base para a manufatura sustentável.

Figura 21 – Evolução das estratégias de manufatura

Fonte: Adaptado de Jawahir et al. (2006)

O conceito de *GM* visa à redução de impactos ambientais em nível de manufatura ou de CVP de acordo com a definição de *GM* considerada (rever Quadro 5). Enquanto isso, no *Lean manufacturing* a redução de impactos ambientais é um efeito secundário resultante do objetivo principal de se reduzir o desperdício de tempo e de recursos na manufatura, conforme os princípios do sistema *lean* (BHASIN; BURCHER, 2006):

- **Superprodução:** evitar a produção em excesso, e trabalhar com estoques mínimos;
- **Inventário:** reduzir o inventário de insumos e de matérias primas a níveis mínimos.
- **Movimentação:** os processos de fabricação devem ser flexíveis permitindo produzir rapidamente diferentes lotes de grande variedade de produtos;

- **Defeitos:** reduzir o índice de geração de produtos defeituosos, o retrabalho, assim como a ineficiência dos processos produtivos pelo excesso na geração de resíduos;
- **Processos puxados:** os produtos não devem ser empurrados para o fim da cadeia de produção, mas sim, devem ser puxados pelo cliente final para reduzir estoques em processo;
- **Tempo de espera:** eliminar todas as atividades que não têm valor agregado e que gerem tempos de espera desnecessários nos processos de fabricação.

Pelos princípios supracitados, a relação benéfica entre *lean* e *green manufacturing* ocorre quando: o **tempo de espera** é reduzido, pois atividades desnecessárias que consomem recursos são evitadas, e assim, os impactos ambientais associados também são evitados; ou quando o índice de **defeitos** é reduzido, pois os impactos ambientais também serão minimizados devido a menor geração de resíduos no processo; outro exemplo é quando as atividades de **movimentação** são otimizadas reduzindo-se as distâncias de transporte interno entre uma máquina e outra, pois isso faz com que menos energia seja consumida nos processos de transporte, e consequentemente os impactos indiretos pela geração de GEE também são minimizados. Portanto, os princípios do *lean manufacturing* incluem muitos aspectos que permitem transformar os processos produtivos em atividades ambientalmente mais adequadas, mas por outro lado, podem não incluir todos os elementos necessários.

2.5.2. Motivações para a GM

As motivações para a adoção da GM podem ser elencadas nos seguintes itens:

- **Escassez de recursos:** Garetti e Taisch (2012) citam que o crescimento demográfico no mundo deverá continuar até que em 2050 a população mundial atingirá 9,0 bilhões de pessoas. Como efeito, Keinan e Clark (2012) exaltam a escassez de recursos naturais, pois quanto maior a população, maior será sua demanda por produtos, o que culmina no aumento de impactos sobre o meio ambiente. Assim, torna-se necessário reduzir o impacto ambiental por unidade de produto posto no mercado, sendo neste ponto, essencial a adoção da GM;
- **Pressão da sociedade:** D'Souza et al. (2007) explicam que a relação entre a sociedade e o meio ambiente tem evoluído, passando de uma visão exploratória na utilização de recursos naturais para um novo paradigma, onde a sustentabilidade ambiental deve prevalecer. Corroborando, Garetti e Taisch (2012) citam que em um levantamento feito em diversos países (e.g., China, Estados Unidos, França, Japão, etc.), que 64,0% dos entrevistados declararam optar pela compra de produtos ambientalmente adequados. Já no Brasil, Ventura (2009) afirma que o perfil de consumo da população deve mudar significativamente para os próximos 20 anos, destacando-se a maior consciência socioambiental dos brasileiros quanto à

aquisição e uso de produtos. Portanto, com essa maior consciência ambiental da sociedade, as empresas devem adequar seus processos produtivos e produtos para que impactem cada vez menos sobre o meio ambiente, sendo esta uma oportunidade chave para adoção da *GM*;

- **Pressão política:** Gungor e Gupta (1999) e Gutowski et al. (2005) destacam a pressão governamental sobre as empresas para que adequem seus processos e produtos a certos padrões de qualidade ambiental. Por exemplo, nos Estados Unidos, destaca-se o inventário de emissões tóxicas (*Toxic Release Inventory – TRI*), lançado em 1987 pela USEPA em todo o país, e que encoraja as indústrias de manufatura a monitorarem suas emissões anuais de materiais tóxicos ao ar, água, e solo. Já na Europa, destacam-se a já mencionada PIP (HAUSCHILD; JESWIET; ALTING, 2005) e a Diretiva Europeia 94/62/EC (MCKERLIE; KNIGHT; THORPE, 2006), sendo esta última sobre a gestão de embalagens e de resíduos sólidos industriais, a qual responsabiliza os fabricantes pela logística reversa e a gestão de embalagens e de resíduos postos no mercado junto aos produtos comercializados. No Brasil, em 2010, foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que objetiva uma melhor gestão de resíduos sólidos industriais via logística reversa de pós-consumo (BRASIL, 2010). Assim, a adoção da *GM* pelas indústrias se mostra importante, pois pode facilitar o atendimento destas e de outros exemplos de políticas ambientais;
- **Vantagens competitivas:** a *GM* propicia vantagens competitivas por promover uma melhor ecoeficiência industrial. Além dos benefícios ambientais, com a adoção da *GM* geram-se ganhos financeiros pela redução de custos com a compra de matérias primas e insumos, a gestão e o tratamento de resíduos, e até mesmo se evitam multas pelo descumprimento de leis e de regulamentações ambientais (DORNFELD et al., 2013; GUTOWSKI et al., 2005).

Na busca pelo desenvolvimento sustentável a *GM* torna-se parte importante deste processo. Porém, a adoção da *GM* ainda esbarra em limitações como as discutidas a seguir.

2.5.3. Barreiras e medidas de contorno

Segundo Dornfeld et al. (2013) as principais barreiras para a *GM* são:

- **Barreiras econômicas:** como visto na Figura 19 da seção 2.5, a *GM* foca atualmente no emprego de medidas proativas de gestão ambiental. Por outro lado, os problemas ambientais na indústria ainda são muitas vezes tratados empregando-se estratégias reativas de gestão ambiental, que se baseiam na aplicação de tecnologias de fim de tubo, no tratamento e na disposição final de resíduos. Isto gera custos extras às empresas devido ao investimento necessário em infraestrutura, equipamentos, gestão e transporte de resíduos, o que impede fortemente a prática da *GM*. Assim, para superar esta barreira, Jabbour (2015) e Jovane et al.

(2008) explicam que é necessário a mudança de postura das empresas, para que deixem de empregar tais medidas reativas e passem a integrar as medidas proativas de gestão ambiental;

- **Barreiras tecnológicas:** a indústria tem que contar com certos processos e recursos (materiais e energia) para produzir os produtos, os quais podem causar efeitos indesejáveis sobre o meio ambiente e à saúde humana, mas que no momento não podem ser evitados pela falta de tecnologias mais adequadas. Kim, Kalis e Adams (2001) citam o caso do setor automotivo, onde cerca de 80,0% das emissões tóxicas geradas na produção de um carro ocorrem durante a pintura devido as grandes quantidades de COVs emitidos ao meio ambiente; a eliminação total da geração de COVs mostra-se difícil pela falta de alternativas tecnológicas mais adequadas. Sendo assim, neste exemplo, a barreira tecnológica se apresenta como o principal entrave para a *GM*. Mesmo assim, se não é possível eliminar a geração dos poluentes por completo, por meio da *GM* é possível minimizá-los. Sobre a pintura de automóveis, Kim, Kalis e Adams (2001) citam o uso de tintas com outras formulações químicas menos tóxicas, e a redução do uso de materiais de revestimento durante a pintura;

- **Barreiras gerenciais:** Dornfeld et al. (2013), Jabbour (2015), e Silva, Ometto e Silva (2016) explicam que em prol da *GM* a indústria necessita de meios cientificamente apropriados para tratar questões relevantes tais como: quais são os impactos ambientais que os processos de manufatura geram, e quais são suas respectivas magnitudes? Quais são os processos de manufatura mais ambientalmente impactantes numa indústria? Como que a etapa de manufatura pode afetar os impactos ambientais do CVP? Para resolver estas e outras questões do gênero, o emprego isolado de ferramentas, técnicas e metodologias convencionais de gestão ambiental podem não ser suficientes, pois os processos de manufatura muitas vezes podem ser complexos (e.g., podem estar sujeitos ao emprego de diversas máquinas, diversas condições de processamento, o consumo de diferentes tipos de materiais e emissões). Assim, o uso isolado, por exemplo, da P+L ou da ACV se mostra limitado, ainda que na literatura sejam as principais formas conhecidas para se promover a *GM*. Para promover a *GM*, Kellens et al. (2012a,b) discutem que antes de empregar diretamente a ACV, é necessário adaptá-la para sua aplicação no contexto de processos de manufatura. Já Dornfeld et al. (2013) exaltam a necessidade de se criar novas ferramentas gerenciais, por exemplo, com foco em métricas e indicadores específicos de *GM* (JOUNG et al., 2012; REICH-WEISER et al., 2013), e em novos métodos de coleta de dados, avaliação e suporte de informações aos tomadores de decisão na indústria que (ARAÚJO, 2010; LEE; KANG; NOH, 2014; SHAO; KIBIRA, 2010; VIJAYARAGHAVAN; HELU, 2013). Assim, visando superar este tipo de barreira gerencial, será discutido ao longo da seção 4.1.1 que nos últimos anos diversos autores têm trabalhado em proposições de novas metodologias, ferramentas, modelos teóricos, etc. que possam ser utilizados em estudos de *GM*.

2.6. Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

Como discutido até aqui, a indústria de manufatura se apresenta como um importante setor para a economia de qualquer nação, devida a sua influência socioeconômica. Por outro lado, as atividades da indústria desencadeiam diversos impactos ambientais, seja por meio do consumo de recursos materiais e energéticos, ou pela geração de emissões ao ar, água e solo.

Como área de pesquisa, as publicações em *GM* têm se mostrado mais acentuadas nos últimos anos, conforme o evolutivo da Figura 22. Percebe-se que o período de 1991-2000 contabilizou cerca de 10,0% do total de artigos publicados em periódicos internacionais, e que a quantidade máxima de publicações ocorridas foi de 7 artigos em 1998/99. Todavia, desde 2001 que ao menos 7 artigos são publicados anualmente, e 53,6% das publicações estão concentradas nos últimos cinco anos, o que confirma a ascensão da temática de *GM*.

Figura 22 – Evolutivo da produção científica em *GM*

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2015b), e Silva, Ometto e Silva (2016)

Entre as publicações levantadas foi verificada a baixa participação brasileira nas pesquisas de *GM* comparativamente aos líderes na área, Estados Unidos e China. Assim, mais estudos para o contexto brasileiro são desejados, o que também serviu para motivar a

realização desta tese de doutorado. Sobre os temas mais abordados, Silva, Ometto e Silva (2016) sistematizaram os seguintes tópicos:

- a) Propostas teóricas (metodologias, métodos, modelos) baseados no conceito de *GM*;
- b) Monitoramento e avaliação do consumo de energia em processos de fabricação;
- c) Custos de manufatura e as iniciativas de *GM*;
- d) *GM* e a aplicação da ACV;
- e) Estudos de caso envolvendo processos de usinagem;
- f) Utilização da *GM* para a seleção de novas tecnologias de manufatura;
- g) Desenvolvimento de indicadores de desempenho baseados na *GM*.

Entre os tópicos elencados, esta tese contribui diretamente para o desenvolvimento dos temas **a)**, **b)**, **d)**, **e)** e **g)**, conforme discussão que será feita ao longo da seção 4.2.1.

3. METODOLOGIA

Inicialmente será apresentado o método de pesquisa adotado (seção 3.1), e depois, os procedimentos técnicos do método de pesquisa (seção 3.2).

3.1. Método de pesquisa

Baseado em Gil (1999), o método de pesquisa adotado neste trabalho foi classificado:

- **Natureza:** pode ser do tipo pura ou aplicada. A presente tese de doutorado se caracterizou por ser uma **pesquisa aplicada**, pois objetivou gerar conhecimentos para a aplicação prática e voltados à solução de problemas de um público-alvo específico. No caso, o objetivo foi o de desenvolver e testar um procedimento de *GM* para apoio no processo de tomada de decisão no ambiente fabril, sendo o público focal as indústrias de manufatura;
- **Abordagem do problema:** se classifica em pesquisa qualitativa e/ou quantitativa. Esta tese foi definida como sendo **quali-quantitativa**. Sua abordagem qualitativa advém da análise das proposições teóricas de *GM* no intuito de identificar suas lacunas e oportunidades de melhoria, visando à proposição de um novo procedimento que pudesse superar as lacunas encontradas como será visto na seção 3.2.1. Já a abordagem quantitativa, esteve associada ao teste prático do procedimento proposto, conforme será detalhado nas seções 3.2.2 e 3.2.3;
- **Objetivos:** sobre a natureza dos objetivos da pesquisa ela pode ser de três tipos: exploratória, descritiva e explicativa. Esta pesquisa foi classificada como **exploratória, descritiva e explicativa**. Ela se mostrou exploratória, pois a *GM* ainda é uma área não consolidada na literatura, sendo que as publicações no tema tem se intensificado somente nos últimos anos, como mostrado na seção 2.6. Também, esta pesquisa pode ser assumida como descritiva, pois foi realizada uma descrição detalhada do procedimento de *GM* proposto nesta tese (ver seção 4.1.2). Por último, a pesquisa ainda foi considerada explicativa, pois foi realizada a explicação da relação causa-efeito entre os fenômenos estudados frente aos fatores que mais afetaram os mesmos; no caso, os fenômenos estudados foram os impactos ambientais no CVP, e os fatores foram àqueles provenientes da aplicação do procedimento desenvolvido (e.g., aspectos ambientais, categorias de impacto ambiental, parâmetros de processo, RTQP).

Assim, o método de pesquisa adotado pode ser resumido da seguinte forma: do ponto de vista de sua natureza, como pesquisa aplicada; do ponto de vista da forma de abordagem do problema, como pesquisa quantitativa e qualitativa; e do ponto de vista de seus objetivos, como pesquisa exploratória, descritiva e explicativa.

3.2. Procedimentos técnicos do método de pesquisa

Diferentemente do método de pesquisa, que corresponde ao planejamento da pesquisa em sua dimensão mais ampla, os procedimentos técnicos correspondem ao planejamento da pesquisa em escala menor, pois envolve a definição da amostra, objeto de estudo, os instrumentos e técnicas de coleta e de interpretação de dados (GIL, 1999).

Sob o ponto de vista dos procedimentos técnicos de pesquisa, este trabalho se fundamentou na **pesquisa bibliográfica**, **estudo de caso**, e na **pesquisa experimental**. A escolha da pesquisa bibliográfica (seção 3.2.1) foi importante para o levantamento de fontes de informações sobre as principais proposições teóricas de *GM* existentes. Feito isso, essas proposições foram analisadas e os resultados serviram de base para a proposta de um novo procedimento de *GM*. Depois, o estudo de caso (seção 3.2.2) e a pesquisa experimental (seção 3.2.3) foram escolhidos para a realização do teste prático do procedimento desenvolvido.

3.2.1. Pesquisa bibliográfica

A maior parte das fontes bibliográficas consultadas foi obtida em publicações periódicas de revistas científicas. Por meio da pesquisa bibliográfica foi determinado o “estado da arte” em pesquisas envolvendo o tema de *GM*, conforme detalhes na Figura 23.

Para a **Etapa 1**, primeiramente foram definidas as bases de dados, sendo elas:

- *ISI Web of Science* (<http://scientific.thomson.com/products/wos/>): maior base de dados multidisciplinar no mundo, com mais 8700 revistas e 54 milhões de publicações. Conta também com mais 6,5 milhões de artigos publicados em mais de 160 mil anais de eventos;
- *Science Direct* (<http://www.sciencedirect.com>): acesso a revistas e capítulos de livros distribuídos entre mais de 2500 revistas e cerca de 20 mil livros indexados;
- *Scholar Google* (<http://scholar.google.com>): permite a busca por artigos publicados em periódicos, livros, anais de eventos, etc. Esta base de dados se mostra vantajosa por ser de acesso gratuito e de uso simples, além disso, pode ser utilizada para encontrar fontes bibliográficas não indexadas em bases de dados convencionais (e.g., teses e dissertações);
- *Springer* (<http://www.springer.com/?SGWID=12-102-0-0-0>): esta base de dados foi utilizada exclusivamente para que se pudesse realizar buscas por artigos de *GM* publicados em anais do evento *CIRP International Conference in Life Cycle Engineering* (CIRP LCE), até o ano de 2013. O evento é mundialmente reconhecido e organizado por instituições de pesquisa vinculadas ao *Collège International pour la Recherche en Productique* (CIRP – Academia Internacional de Engenharia de Produção). Até o ano de 2013, os anais de cada edição do CIRP LCE eram disponibilizados na base de dados da *Springer*, e como esta não

pôde ser acessada diretamente por meio das demais bases de dados supracitadas, foi necessário utilizá-la a parte para a busca de artigos.

Figura 23 – Representação esquemática das fases de desenvolvimento da pesquisa bibliográfica

Fonte: elaborado pelo autor

Sobre os critérios de busca, ainda na **Etapa 1**, foram selecionadas apenas as publicações: formato texto completo, tipo de documento – publicação periódica ou livro, idioma – inglês ou português, e período de publicação até **Dezembro de 2015**. As palavras-chave principais foram “*sustainable manufacturing*” e “*green manufacturing*”, utilizadas nos critérios de busca título e assunto. Depois, outras palavras-chave foram inseridas na busca pela similaridade de resultados obtidos comparativamente aos que utilizaram apenas as palavras-chave principais. As palavras-chave secundárias foram as já previamente apresentadas no Quadro 5 da seção 2.5.1: *environmentally conscious manufacturing*, *environmentally benign manufacturing*, *environmentally responsible manufacturing*, e *eco-friendly manufacturing*. Assim, a sentença geral de pesquisa foi:

(“*green manufacturing*” OR “*sustainable manufacturing*” OR “*environmentally conscious manufacturing*” OR “*environmentally benign manufacturing*” OR “*environmentally responsible manufacturing*” OR “*eco-friendly manufacturing*”).

Ao todo foram selecionados 333 artigos, e diante disso, foram identificados os artigos que apresentaram proposições teóricas, i.e., propostas de sistemas, metodologias, *frameworks*,

métodos, modelos, técnicas ou ferramentas de *GM*. A partir dessa triagem, foram selecionadas 36 publicações. Os demais 297 artigos tratam-se de estudos teórico-empíricos baseados em estudos de caso, revisões de literatura, estudos experimentais, *surveys*, etc.

Os 36 artigos selecionados estão apresentados no Quadro 6, organizados primeiramente em ordem cronológica, e posteriormente, seguindo a ordem alfabética pela coluna “*autoria*”.

	Autoria	Título da obra
1	SARKIS (1999)	▪ <i>A methodological framework for evaluating environmentally conscious manufacturing programs</i>
2	CURKOVIC (2003)	▪ <i>Environmentally responsible manufacturing: the development and validation of a measurement model</i>
3	NARITA, KAWAMURA e NORIHISA (2006)	▪ <i>Development of prediction system for environmental burden for machine tool operation (1st report , proposal of calculation method for environmental burden)</i>
4	JESWIET e KARA (2008)	▪ <i>Carbon emissions and CESTM in manufacturing</i>
5	TAN et al. (2008)	▪ <i>A decision-making framework model of cutting tools selection for green manufacturing and its application</i>
6	ARAÚJO (2010)	▪ <i>Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade</i>
7	LI et al. (2010a)	▪ <i>AHP Based SWOT analysis for green manufacturing strategy selection</i>
8	LI et al. (2010b)	▪ <i>A methodology for selecting a green technology portfolio based on synergy</i>
9	SHAO e KIBIRA (2010)	▪ <i>Decision support for sustainable manufacturing using decision guidance query language</i>
10	YAN e FEI (2010)	▪ <i>Methods for integrating energy consumption and environmental impact considerations into production operation of machining processes.</i>
11	DEIF (2011)	▪ <i>A system model for green manufacturing</i>
12	OECD DSTI (2011)	▪ <i>OECD Sustainable Manufacturing Toolkit: seven steps to environmental excellence</i>
13	BEHRENDT et a. (2012)	▪ <i>Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools</i>
14	DESPEISSE et al. (2012a)	▪ <i>Industrial ecology at factory level: a prototype methodology</i>
15	DESPEISSE et al. (2012b)	▪ <i>Industrial ecology at factory level – a conceptual model</i>
16	JIANG, ZHANG e SUTHERLAND (2012)	▪ <i>Development of an environmental performance assessment method for manufacturing process plans</i>
17	JOUNG et al. (2012)	▪ <i>Categorization of indicators for sustainable manufacturing</i>
18	KELLENS et al. (2012a)	▪ <i>Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description.</i>
19	SMITH e BALL (2012)	▪ <i>Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flows</i>

20	CERINŠEK et al. (2013)	▪ Contextually enriched competence model in the field of sustainable manufacturing for simulation style technology enhanced learning environments
21	JAIN et al. (2013)	▪ Model based continuous improvement methodology for sustainable manufacturing
22	LARREINA et al. (2013)	▪ Smart manufacturing execution system (SMES): the possibilities of evaluating the sustainability of a production process
23	SUBIC et al. (2013)	▪ Performance analysis of the capability assessment tool for sustainable manufacturing
24	TSAI et al. (2013)	▪ A product-mix decision model using green manufacturing technologies under activity-based costing
25	VIKHOREV, GREENOUGH e BROWN (2013)	▪ An advanced energy management framework to promote energy awareness
26	ZHANG, CALVO- AMODIO e HAAPALA (2013)	▪ A conceptual model for assisting sustainable manufacturing through system dynamics
27	GARBIE (2014)	▪ An analytical technique to model and assess sustainable development index in manufacturing enterprises
28	JIN e NOH (2014)	▪ Stochastic model-based framework for assessment of sustainable manufacturing technology
29	LEE e LEE (2014)	▪ A framework for a research inventory of sustainability assessment in manufacturing
30	Lee, Kang e Noh (2014)	▪ MAS 2 : an integrated modeling and simulation-based life cycle evaluation approach for sustainable manufacturing
31	ZENDOIA et al. (2014)	▪ A specific method for the life cycle inventory of machine tools and its demonstration with two manufacturing case studies
32	EASTWOOD e HAAPALA (2015)	▪ A unit process model based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing
33	KIM et al. (2015)	▪ A decision-guidance framework for sustainability performance analysis of manufacturing processes
34	SHIN et al. (2015)	▪ Process-oriented life cycle assessment framework for environmentally conscious manufacturing
35	SPROEDT et al. (2015)	▪ A simulation-based decision support for eco-efficiency improvements in production systems
36	ZHAO et al. (2015)	▪ Energy simulation framework integrated with green manufacturing-enabled PLM information model

Quadro 6 – Lista de métodos, modelos, metodologias, frameworks, técnicas e ferramentas de GM

Fonte: elaborado pelo autor

Para a **Etapa 2** os artigos do Quadro 6 foram analisados conforme os critérios:

- **Abrangência:** foi avaliado se o foco dos estudos estava apenas na etapa de manufatura ou se incluía a visão de CVP. Também foi averiguado o nível de detalhes em que a etapa de manufatura foi analisada em cada artigo, ou seja:

- a) **Black-box:** as proposições teóricas de *GM* que não especificaram os processos de manufatura em nível de operações foram enquadradas neste quesito;
- b) **Operação:** os artigos consideraram a etapa de manufatura em nível de processo elementar, conforme cada tipo operação (e.g., usinagem, montagem, prensagem, etc.). Portanto, aqui os impactos ambientais foram estudados em maior nível de detalhes, por exemplo, correlacionando-os aos parâmetros de processo (temperatura, pressão, vazão de fluido, etc.) e/ou estratificando-os em nível das subunidades existentes (e.g., máquina-ferramenta, sistema de aquecimento, fornecimento de ar comprimido, etc.);
- **Objetivo e escopo:** os artigos foram classificados em termos dos seus objetivos, etapas, aspectos e impactos ambientais estudados, e sob a forma de interpretação dos resultados;
 - a) **Objetivo:** há artigos com objetivos completamente diferentes. Por exemplo, no Quadro 6, Jeswiet e Kara desenvolveram uma ferramenta para o cálculo da pegada de carbono em processos de manufatura. Já Li et al. (2010b) desenvolveram uma metodologia para a seleção de portfólio de tecnologias de manufatura. Portanto, a classificação de todos os artigos quanto aos seus objetivos de pesquisa foi importante para um melhor entendimento do pesquisador sobre o enfoque de cada publicação;
 - b) **Aspectos e impactos ambientais:** há artigos que focaram apenas na questão do consumo de energia, enquanto que há outros que incluíram a geração de resíduos, emissões de GEE, etc. Além disso, foram verificados quais foram os artigos que levaram em conta os impactos ambientais associados aos aspectos estudados, e quais foram as categorias de impacto selecionadas. Finalmente, também foram analisados aqui quais estudos integraram ou não o uso da ACV em seu escopo;
 - c) **Etapas de aplicação:** trata-se de identificar as etapas de aplicação de cada proposição teórica de *GM*. Esta identificação de etapas foi importante para a visualização de similaridades e diferenças entre cada proposição estudada;
- **Limitações:** foram tomadas as limitações reconhecidas pelos próprios autores dos artigos, e também, outras limitações adicionais identificadas durante a pesquisa bibliográfica.

Por meio desses critérios de classificação, foi possível realizar a **Etapa 3** da pesquisa bibliográfica, e os resultados serão apresentados na seção 4.1.2.

3.2.2. Estudo de caso

Para Gil (1999) e Yin (2005) o estudo de caso é tido como o delineamento mais adequado para a investigação de um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto real, podendo ser do tipo caso único ou casos múltiplos.

Nesta tese, foi utilizado um projeto de **casos múltiplos** por ser considerada uma abordagem mais robusta e convincente em termos das evidências resultantes (YIN, 2005). A realização de estudos de caso múltiplos segundo Yin (2005), permite seguir a lógica da “replicação” comumente adotada em pesquisas experimentais, permitindo que as conclusões analíticas sejam mais contundentes do que aquelas que surgem apenas de um caso isolado.

O estudo de casos múltiplos possibilitou testar o procedimento de *GM* proposto juntamente às indústrias de manufatura a seguir abordadas. Para isso, os estudos de caso foram organizados conforme mostra a Figura 24.

Figura 24 – Representação esquemática das etapas para a execução dos estudos de caso

Fonte: adaptado de Yin (2005)

A Figura 24 exibe três macroetapas: definição e planejamento; preparação, coleta e análise; e análise e conclusão. A primeira macroetapa apresenta o **desenvolvimento da teoria** como primeira etapa. Nesta tese, esta etapa envolveu os resultados da **pesquisa bibliográfica**, tratando-se da proposta teórica do procedimento de *GM* que será detalhado na seção 4.1.2.

Com base na teoria estabelecida, os próximos passos foram a **seleção dos casos** e do **protocolo de coleta de dados**. Os casos selecionados neste estudo são apresentados no Quadro 7, e o protocolo de coleta de dados é apresentado no **Apêndice A**. Em função do protocolo elaborado, questionários de pesquisa foram estabelecidos para utilização durante a condução dos estudos nas indústrias via entrevistas. Assim, foram utilizados os questionários dos **Apêndices C e D**. Posteriormente, o questionário do **Apêndice E** também foi aplicado.

Para a seleção dos casos, foram inicialmente projetados 4 estudos de caso tomando como premissa a escolha de indústrias de manufatura de diferentes ramos de atuação. Esta estratégia foi definida tendo em vista o amplo número de subdivisões da indústria de manufatura, conforme apresentado no início da seção 2.1. As empresas inicialmente contatadas entre Setembro de 2014 e Maio de 2015 pertenciam às seguintes subdivisões: 2 indústrias de manufatura de peças para autoveículos, e 2 indústrias de manufatura de produtos de madeira. As identidades das empresas contatadas não foram divulgadas neste documento por questões de sigilo das mesmas. Contudo, apenas 2 indústrias consultadas participaram da execução desta pesquisa, conforme mostrado no Quadro 7.

Indústria de manufatura	Descrição	Produto escolhido
Indústria madeireira	Empresa do ramo madeireiro de painéis de madeira reconstituída, situada na região oeste do estado de São Paulo.	Painel de madeira aglomerada de média densidade
Indústria automotiva	Empresa situada na região metropolitana de São Paulo/SP, que realiza a manufatura de válvulas para uso em motores de autoveículos.	Válvula automotiva de motor

Quadro 7– Resumo dos estudos de caso selecionados nesta tese

Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 7, os produtos a serem avaliados foram escolhidos pelas próprias empresas consultadas. Ao longo da seção 4.2, serão disponibilizados maiores informações sobre as indústrias e os produtos selecionados para os estudos de caso.

Outro detalhe na Figura 24 é a linha pontilhada que indica a possível retroalimentação de informações geradas durante a prática dos estudos de caso, as quais podem gerar modificações na teoria inicial que norteou os estudos. Nesta tese, possíveis modificações na teoria inicial significaram alterar o procedimento de *GM* desenvolvido durante a pesquisa bibliográfica. Uma discussão sobre este ponto será feita na seção 4.3.

Pela Figura 24, o próximo passo envolveu a macroetapa de **preparação, coleta e análise**, a qual para Yin (2005) se remete a parte prática do estudo de caso. Nesta macroetapa, os dois estudos do Quadro 7 foram executados segundo o protocolo do **Apêndice A**.

Pelo fato dos produtos do Quadro 7 serem produtos intermediários e não finais, durante a macroetapa de preparação, coleta e análise, foi necessário obter informações de fora do alcance e de responsabilidade das empresas inicialmente consultadas, conforme o esquema da Figura 25. Para o estudo na indústria de painéis aglomerados (**estudo de caso 1**), foi realizada

uma entrevista junto a uma produtora de móveis situada na região oeste do estado de São Paulo. Esta visita técnica foi importante para coletar as informações necessárias sobre as atividades de uso dos painéis na produção de móveis, e as estratégias de fim de vida dos mesmos (i.e., abordagem *gate-to-grave*). Já para a indústria automotiva (**estudo de caso 2**), foi consultado um de seus clientes situado na região centro-leste do estado de São Paulo para a coleta de dados sobre o uso das válvulas em motores de veículos e o pós-uso das mesmas. Ademais, todas as informações relacionadas ao CVP *cradle-to-gate* dos produtos abordados nos estudos de caso 1 e 2 foram provenientes diretamente das empresas listadas no Quadro 7.

Figura 25 – Visão geral das fontes de dados para os estudos de caso 1 e 2

Fonte: elaborado pelo autor

Tendo finalizado o processo de coleta de dados de cada estudo de caso, a última macroetapa de **análise e conclusão** foi conduzida. Com base nos resultados obtidos, foram identificados os processos de manufatura mais relevantes ambientalmente para o CVP dos produtos do Quadro 7. De posse desses resultados, então pesquisas experimentais foram direcionadas para os processos de manufatura descritos a seguir na seção 3.2.3.

3.2.3. Pesquisa experimental

A pesquisa experimental consiste em determinar o objeto de estudo, as variáveis de interesse, e as formas de observação dos efeitos que cada variável pode produzir no objeto

estudado (GIL, 1999). Assim, em decorrência dos dois estudos de caso apresentados na seção 3.2.2, foram selecionados dois objetos de estudo para a pesquisa experimental, um relacionado ao estudo de caso na indústria madeireira, e outro resultante do estudo de caso na indústria automotiva. O processo de **prensagem à quente** foi selecionado como objeto de estudo para o caso na indústria de painéis de madeira, e o processo de **retificação *centerless***¹³ foi escolhido em função do estudo de caso realizado na indústria automotiva.

A seleção dos dois processos de manufatura supracitados ocorreu em virtude dos resultados da aplicação prática do procedimento de *GM* proposto nesta tese, conforme será discutido ao longo da seção 4.2. A ideia central foi estudar como que estes dois processos de manufatura poderiam influenciar nos impactos potenciais do CVP, i.e., como que a prensagem à quente poderia afetar os impactos do ciclo de vida do painel de madeira aglomerada, e como que o processo de retificação *centerless* poderia influenciar os impactos do ciclo de vida da válvula automotiva de motor.

Para ambas as pesquisas experimentais, foram inicialmente realizadas entrevistas junto às indústrias estudadas conforme o questionário do **Apêndice E**. Com base neste questionário, foram levantadas as características de funcionamento das máquinas-ferramenta, suas subunidades, os parâmetros de processo, e etc. Então, de posse dessas informações foram realizadas simulações em laboratório para os dois respectivos processos de manufatura, e com isso, foi dada continuidade ao teste prático do procedimento de *GM* desenvolvido.

O estudo envolvendo os dois processos de manufatura escolhidos não foi realizado diretamente nas respectivas indústrias parceiras da pesquisa devido a limitações como: falta de recursos humanos nas empresas para acompanhamento dos testes, indisponibilidade de horário livre para realização dos testes, e/ou a não autorização da alta gerência das empresas para realização de pesquisas diretamente em seus processos de fabricação.

Assim, todas as simulações realizadas em laboratório ocorreram utilizando a infraestrutura disponível na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), campus de São Carlos/SP. Detalhes sobre as atividades realizadas e as máquinas-ferramenta escolhidas para as simulações seguem nos parágrafos abaixo.

Prensagem à quente: prensa hidráulica de pratos, marca Marconi, modelo RA 098/50AUSP

Localizada no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da EESC-USP, a máquina-ferramenta estudada foi a prensa hidráulica vertical composta por dois pratos (um superior e outro

¹³ O termo *centerless* no contexto desta pesquisa se remete ao processo de usinagem do tipo retificação cilíndrica sem centros, em que a peça não se encontra fixa, pois apresenta movimentação induzida pelo rebolo de corte e pelo disco de arraste (MARINESCU et al., 2007).

inferior), marca Marconi, modelo RA 098/50AUSP, ano de fabricação 2000, com capacidade máxima de prensagem de 50 toneladas e temperatura máxima de trabalho de 300°C (Figura 26). A máquina apresenta ainda alimentação elétrica trifásica de 220 V, velocidade de prensagem de 168 mm/min, e peso total de 290 kg.

Figura 26 – Visão geral da prensa hidráulica estudada

Fonte: LaMEM-SET-EESC-USP (2015)

A prensa da Figura 26 foi selecionada para simulação do processo de prensagem à quente por apresentar as mesmas características operacionais da prensa utilizada na produção de painéis aglomerados da indústria estudada. Contudo, sua escala de produção é para fins laboratoriais. Desse modo, a partir do estudo prévio da prensa e da consulta de seu manual de funcionamento, assim como por meio dos dados coletados utilizando o questionário do **Apêndice E**, foram identificadas três subunidades distintas na máquina, as quais são acionadas ou desligadas dependendo do modo de operação em vigor:

- **Subunidade de aquecimento:** formada por dois controladores de temperatura microprocessados tipo PID, sistema de aquecimento elétrico por resistência, sensores de temperatura tipo J, pratos superior e inferior feitos em aço inox com área de prensagem de 400 x 400 mm e espessura de 25 mm. Além disso, a subunidade de aquecimento representa aproximadamente 20,0% do peso total da máquina, portanto, 60,0 kg;
- **Subunidade hidráulica:** responsável por suprir a demanda de óleo pressurizado necessária aos pistões hidráulicos. É composta por um sistema com motor para acionamento elétrico, bomba de palhetas, reservatório de óleo (350x200x400mm), óleo hidráulico (ISO 32, 0,86 g/cm³), filtro e manômetro. Esta subunidade representa 65,0 kg do peso total da máquina;

- **Subunidade de prensagem:** esta situada entre os pratos superior e inferior da subunidade de aquecimento, sendo este o local onde ocorre a consolidação do painel e a liberação de formaldeído livre ao ambiente. Os pistões e as partes estruturais da máquina integram esta subunidade. Os pistões hidráulicos são servo-acionados e apresentam sistema de retorno por molas. A base e os apoios superior e inferior que sustentam a estrutura física da prensa são feitos de ferro fundido (partes em azul na Figura 26). Em termos mássicos, esta subunidade representa 165,0 kg (aproximadamente 57,0% do peso total da máquina).

Além das subunidades, também foram definidos os modos de operação do processo de prensagem com base na metodologia UPLCI proposta por Kellens et al. (2012a):

- **Iniciação:** modo de operação no qual apenas a subunidade de aquecimento está operando. Este modo se inicia logo após o botão de acionamento do sistema de aquecimento ser ligado, e a temperatura de trabalho ser definida no sistema de controle de temperatura;
- **Espera:** modo no qual a prensa está pronta para iniciar a prensagem do material. A subunidade de aquecimento está energizada, e opera de modo intermitente apenas para corrigir e manter o *setpoint* de temperatura. Já a subunidade hidráulica está operando em modo circulação (sem exercer pressão entre os pratos da prensa), pois não há material para ser prensado neste momento. Este modo de operação ocorre em dois momentos distintos: 1) logo após o modo de iniciação da máquina ter sido finalizado até a inserção e o ajuste do material para prensagem; e 2) imediatamente após a finalização do modo de prensagem, a partir da elevação do prato superior da prensa, seguido da retirada do painel consolidado, até a inserção do próximo material para prensagem e o ajuste da pressão no manômetro. O tempo de espera adotado para os experimentos foi de 5 min para ambas as situações 1) e 2);
- **Prensagem:** ocorre sempre após ter sido finalizado o modo de espera. Todas as subunidades da máquina estão ativas realizando a prensagem conforme a temperatura e pressão definidas. O controle do tempo de prensagem foi realizado utilizando um cronômetro. Para todos os experimentos realizados o tempo de prensagem adotado foi de 10 minutos.

O processo de prensagem à quente dos painéis de madeira depende basicamente de três variáveis chave: **pressão**, **temperatura** e **tempo** de prensagem. Estes parâmetros foram estabelecidos nos experimentos com base nas informações coletadas durante as visitas técnicas realizadas na empresa produtora do produto, como mostra o Quadro 8. O tempo de prensagem foi fixado em 10 min, portanto, foi analisado apenas o efeito da variação da pressão e da temperatura de prensagem nos experimentos conduzidos.

Parâmetros de processo selecionados	Unidade	Faixa de operação			
Pressão	MPa	3	3,5	4	4,5
Temperatura	°C	160	165	170	-
Tempo	Min	10			

Quadro 8– Parâmetros de processo estudados no processo de prensagem à quente
Fonte: elaborado pelo autor

Em virtude da **análise estatística** dos resultados, foi necessário repetir os testes realizados conforme o procedimento de *GM* que será apresentado ao longo da seção 4.1.2. Assim, cada uma das 12 condições experimentais extraídas a partir do Quadro 8 foi repetida em tréplica neste estudo, resultando num total de 36 experimentos (4 x 3 x 1 x 3).

Para cada experimento foi realizado o monitoramento dos principais aspectos ambientais do processo de prensagem para os três modos de operação e as três subunidades da prensa. Os aspectos monitorados foram consumo de **eletricidade**, e as emissões ao ar de **formaldeído livre**. A escolha desses aspectos ambientais ocorreu em virtude dos resultados da aplicação do procedimento de *GM*, conforme será discutido na seção 4.2.1.

De acordo com os dados primários coletados na indústria produtora de painéis, os painéis aglomerados foram produzidos em laboratório com espessura nominal de 15,0 mm e densidade nominal de 700,0 kg/m³. No Quadro 9, são sumarizadas as principais características das matérias primas madeira e resina ureia-formaldeído adotados durante os experimentos.

Matéria prima	Descrição
Madeira	As partículas de madeira foram provenientes da espécie de <i>Eucalyptus saligna</i> , sendo classificadas em dois grupos: material de camada interna (CI) e de camada externa (CE). Na CE de cada painel produzido foram aplicadas partículas com dimensões de até 1,18 mm, enquanto que na CI foram utilizadas partículas com dimensões de 1,18 a 2,38 mm.
Resina ureia-formaldeído	Com base nos dados primários da indústria de painéis, durante a manufatura de cada chapa foi aplicado 12,0% de resina em relação ao peso seco das partículas de madeira (CE e CI). Além disso, a resina utilizada apresentou razão molar formaldeído/ureia de 1,35, teor de sólidos de 64,0%, e densidade de 1,27 g/cm ³ .

Quadro 9– Resumo das principais características das matérias primas: madeira e resina ureia-formaldeído
Fonte: elaborado pelo autor

Assim, em função dessas informações obtidas, foram calculadas as quantidades de madeira (em g) e de resina ureia-formaldeído (em g) a serem consumidas no processo para

cada um dos 36 painéis aglomerados produzidos. Tanto o consumo de madeira quanto o de resina foram controlados em laboratório por gravimetria, utilizando-se balança analítica com precisão de 0,1 g (ver Figura 27). Além da resina e da madeira, para a produção dos painéis também foi necessário aplicar aditivos químicos, no caso, a emulsão de parafina e o catalisador sulfato de amônio, ambos adicionados na proporção de 1,0%, respectivamente, em relação à massa consumida de madeira e de resina ureia-formaldeído por chapa produzida.

- 1) Balança analítica para pesagem do material.
- 2) Bacia com as partículas de **madeira** de eucalipto para mistura junto aos demais insumos.
- 3) Recipiente com o catalisador **sulfato de amônio**.
- 4) Recipiente com a **emulsão de parafina**.
- 5) Recipiente com a **resina ureia-formaldeído**.

Figura 27 – Insumos utilizados na produção dos painéis aglomerados

Fonte: LaMEM-SET-EESC-USP (2015)

O consumo de eletricidade (em kWh) no processo de prensagem foi monitorado em função do estudo de potência da prensa. Para isso, um alicate amperímetro digital marca Minipa, modelo ET-3200A, com precisão de 0,01 A foi instalado na entrada principal de alimentação de cada subunidade da prensa para medir o consumo de corrente elétrica em função de cada modo de operação vigente (ver Figura 28). Como a tensão elétrica nominal da prensa era de 220 V, multiplicando-se os valores de corrente elétrica pela tensão da máquina, foi possível calcular a potência ativa (em W). Para cada modo de operação e subunidade da prensa, o tempo de experimento (em s) foi medido utilizando-se um cronômetro digital. Assim, multiplicando-se os resultados de potência e de tempo foram calculados os consumos de eletricidade. Por fim, é importante ressaltar que a amostragem da corrente elétrica ocorreu

a cada 30 segundos de experimento, e que pontos de variação abruptos nos resultados de corrente foram excluídos dos cálculos de consumo de eletricidade.

Figura 28 – Alicates amperímetro e amostragem do consumo de eletricidade na prensa hidráulica. 1) alicate amperímetro; 2) detalhe da amostragem da corrente elétrica em um dos cabos de alimentação da prensa; 3) visão geral da prensa hidráulica e do processo de amostragem da corrente elétrica.

Fonte: LaMEM-SET-EESC-USP (2015)

Para o monitoramento das emissões ao ar de formaldeído livre (em g), foi realizada uma estimativa em função do peso (em g) e do teor de umidade (em %) de cada painel produzido, e considerando a classe E2 de painéis pela norma NBR 14810-2:2013 (ABNT, 2013). Painéis aglomerados classificados como E2 devem apresentar teor de emissão de formaldeído livre superior a 8 mg e inferior ou igual a 20 mg para cada 100 g de painel seco (ABNT, 2013).

Cada um dos 36 painéis foi produzido com dimensões de 300 mm x 300 mm x 15 mm. Portanto, o monitoramento do consumo de eletricidade e a emissão de formol livre durante o processo de prensagem estiveram associados diretamente a este volume de produto.

Após a produção, os painéis foram ensaiados para determinação de seus RQTP. Tais requisitos envolvem a determinação de propriedades físicas e mecânicas de cada painel, sendo que no Brasil, os ensaios devem ser realizados de acordo com a norma NBR 14810-2:2013 (ABNT, 2013). Assim, com base nessa norma e nas informações levantadas durante as visitas técnicas feitas na empresa produtora de painéis, os seguintes requisitos foram escolhidos:

- **Densidade:** trata-se da relação direta massa/volume do material, sendo que a densidade dos painéis aglomerados deve estar entre 400,0 kg/m³ a 800,0 kg/m³ (ABNT, 2013). A massa

e o volume dos corpos-de-prova foram determinados utilizando balança eletrônica digital da Atec, modelo BDC-3300 e paquímetro digital da Starrett, modelo 799;

- **Espessura:** ABNT (2013) classifica a espessura das chapas aglomeradas em grupos, sendo que o painel de 15,0 mm estudado nesta tese encontra-se no grupo de 13,0-20,0 mm;
- **Inchamento em espessura:** trata-se da propriedade física que determina o inchamento máximo em espessura do material devido à absorção de água. Para os painéis com 15,0 mm de espessura, classificados como não estruturais e para uso interno em condições secas (Tipo P2), ABNT (2013) cita que o inchamento máximo após 24 horas de imersão do material em água deve ser de 18,0%. A espessura dos corpos-de-prova foi medida utilizando paquímetro digital da Starrett, modelo 799 (ver Figura 29);
- **Teor de umidade:** determina o percentual de água desprendida do material quando este é submetido a temperatura superior a 100,0°C. O teor de umidade deve variar de 5,0-13,0% (ABNT, 2013), tendo sido determinada utilizando os equipamentos balança eletrônica digital da Atec, modelo BDC-3300 e estufa com circulação de ar marca Marconi, modelo MA 035;
- **Resistência à flexão estática e módulo de elasticidade:** mede a resistência mecânica e o módulo de elasticidade que um corpo-de-prova, apoiado em seus extremos, oferece quando sujeito a uma força aplicada em seu centro até a ruptura. Para painéis de 15,0 mm, classificados como Tipo P2, a resistência mínima na flexão estática deve ser de 11,0 MPa, enquanto que o módulo de elasticidade mínimo deve ser de 1600 MPa (ABNT, 2013). Os ensaios mecânicos foram conduzidos utilizando a máquina universal de ensaios da AMSLER no LaMEM-SET-EESC-USP (detalhes na Figura 29);
- **Resistência na tração perpendicular:** mede a resistência que um corpo-de-prova oferece quando é submetido a uma força de tração perpendicularmente à sua superfície, no sentido do comprimento do corpo-de-prova até a sua ruptura. Para chapas com 15,0 mm de espessura, classificadas como Tipo P2, a resistência mínima na tração perpendicular deve ser de 0,35 MPa (ABNT, 2013). Os ensaios mecânicos foram conduzidos utilizando a máquina universal de ensaios da AMSLER da Figura 29.

Figura 29 – Resumo dos ensaios físico-mecânicos realizados para os painéis aglomerados.

Fonte: LaMEM-SET-EESC-USP (2015)

Retificação centerless: retificadora cilíndrica centerless, marca microma, modelo N1E 0480

Foi estudado o processo de retificação cilíndrica de mergulho, tendo em vista o estudo de caso realizado na indústria de válvulas automotivas. A máquina selecionada foi a retificadora cilíndrica *centerless* marca microma, modelo N1E 0480, ano de fabricação 1998, e que encontra-se localizada no Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA), da EESC-USP (ver Figura 30).

A retificadora da Figura 30 foi selecionada para a simulação do processo de retificação da haste de válvulas de escape feitas de **Inconel 751** (liga composta principalmente por níquel, cromo e ferro) e **Silchrome 1** (liga composta principalmente por ferro, cromo e silício). O Inconel 751 compõe a haste das válvulas, enquanto que a cabeça das válvulas é feita de Silchrome 1.

Descrição dos componentes principais da máquina:

- 1 – Painel de controle da retificadora *centerless*
- 2 – Unidade hidráulica
- 3 – Controlador de velocidade dos dressadores
- 4 – Botão liga/desliga e botão de ativação do ciclo de usinagem
- 5 – Dressador do rebolo de arraste
- 6 – Controlador de velocidade do avanço do rebolo de arraste
- 7 – Parafusos para controle da movimentação transversal do rebolo de arraste
- 8 – Controlador da profundidade de corte na usinagem
- 9 – Rebolo de corte, régua de apoio, e rebolo de arraste
- 10 – Dressador do rebolo de corte
- 11 – Controladores de vazão do fluido de corte

Figura 30 – Visão geral da retificadora *centerless* estudada

Fonte: LAPRAS-NUMA-EESC-USP (2015)

Os componentes principais da retificadora podem ser agrupados em sete subunidades:

- **Subunidade primária:** composto pelo componente 1 da Figura 30, que envolve o painel de controle feito de chapas de aço carbono com dimensões 70x160x50cm. No painel, é possível acionar o botão de “liga/desliga” da máquina e outras subunidades (unidade hidráulica, rebolo de corte e de arraste, lubrificação, etc.). Além disso, também é no quadro de controle que ocorre a programação dos parâmetros de retificação desejados (e.g., rotação do rebolo de corte, rotação do rebolo de arraste, entre outros). Esta subunidade pesa 20,0 kg;
- **Subunidade hidráulica:** trata-se do item 2 da Figura 30. Ela é responsável por suprir a demanda de óleo necessária aos mancais de rolamento dos rebois de corte e de arraste, e também serve para o acionamento hidrostático dos dressadores dos rebois de corte e de arraste. Esta subunidade é composta por um sistema com bomba, motor, trocador de calor e reservatório de óleo com dimensões 350x200x400mm. O motor é trifásico 220V, marca

Eberle, modelo 6 80 A4/DR, e rotação de 1.700 rpm. O óleo hidráulico utilizado é o ISO 32 (densidade de 0,86 g/cm³). Esta subunidade representa 36,0 kg do peso da máquina;

- **Subunidade de dressagem do rebolo de arraste:** contempla os componentes 3 e 5 da Figura 30, sendo que o item 3 mostra o controlador de velocidade dos dressadores de corte e de arraste, enquanto que o item 5 apresenta o dressador do rebolo de arraste. O dressador do rebolo de arraste encontra-se acoplado à retificadora, sendo que o seu acionamento é manual. O controlador de velocidade de dressagem é regulado manualmente, e o dispositivo dressador é composto por uma ponta de diamante que se movimenta ao longo da largura do rebolo de arraste, dressando-o conforme a profundidade de corte pré-definida manualmente. Neste trabalho, a profundidade de dressagem utilizada foi de 0,02 cm, os ângulos de dressagem e de avanço foram ambos de 3,0°, e a velocidade de corte foi fixada em 0,8 cm/s. Pelos dados primários coletados junto à produtora de válvulas, foi estipulado que no máximo a cada oito peças usinadas seria necessário realizar uma nova dressagem do rebolo de arraste;

- **Subunidade de dressagem do rebolo de corte:** envolve os itens 3 e 10 da Figura 30, sendo que o componente 10 mostra o dressador do rebolo de corte. A dressagem do rebolo de corte é acionada manualmente e o dressador encontra-se integrado à retificadora. A dressagem é realizada utilizando ponta de diamante como ferramenta de corte, e neste trabalho foi adotada a profundidade de corte de 0,02 cm, sendo que a cada quatro peças usinadas foi necessário dressar novamente o rebolo. No componente 3 da máquina, foram utilizados três diferentes velocidades de corte, e três números de passes na dressagem (ver Quadro 10);

- **Subunidade de lubrificação:** o item 11 da Figura 30 mostra os controladores de vazão de fluido de corte. O fluido utilizado foi à base de óleo mineral (0,87 g/cm³), aplicado tanto na retificação *centerless* quanto na dressagem do rebolo de corte. A vazão de fluido é controlada manualmente na máquina, e o reservatório de fluido tem capacidade para 125 l, sendo que o fluido bombeado para o processo é reciclado, voltando ao reservatório para decantação do cavaco de usinagem antes de sua reutilização. A bomba de fluido utilizada foi da marca WEG, com potência de 370,0 W e vazão máxima de 5.500,0 l/h. Nesse trabalho, foi estudada a variação da vazão de fluido de corte durante a retificação *centerless*, conforme detalhes no Quadro 10. Por fim, o peso total da bomba mais o reservatório com fluido foi de 125,0 kg;

- **Subunidade do rebolo de arraste:** o item 9 da Figura 30 representa a retificação *centerless*. O rebolo de arraste é feito de liga de borracha com abrasivo de óxido de alumínio marrom, com diâmetro inicial de 184,0 mm, e largura de 120,0 mm. O peso total do rebolo de arraste foi estimado em 10,0 kg;

- **Subunidade do rebolo de corte:** também está ilustrada no item 9 da Figura 30, e maiores detalhes seguem na Figura 31. A retificadora utiliza rebolo de corte feito de óxido de

alumínio modelo 300x120x152.4 37C180 KVK, diâmetro inicial de 300,0 mm, largura de 120,0 mm, rotação e velocidade de corte máxima, respectivamente, de 2105 rpm e 33,0 m/s. O peso total do rebolo de corte é de 20,0 kg.

Figura 31 – Elementos básicos do processo de retificação *centerless*

Fonte: Adaptado de Biffi (2003)

O processo de retificação *centerless* apresenta como elementos básicos o rebolo de corte, o rebolo de arraste e a régua de apoio situada entre os rebolos (ver Figura 31). O ângulo da régua de apoio pode variar de 0,0 a 45,0° (BIFI, 2003), sendo que na retificadora estudada o ângulo da régua era de 30,0°, e o material de sua constituição foi o metal duro.

Além das subunidades, também foram definidos os modos de operação do processo de retificação com base na metodologia UPLCI proposta por Kellens et al. (2012a):

- **Iniciação:** modo de operação no qual as subunidades primária, hidráulica, rebolo de arraste, rebolo de corte e lubrificação são ativadas. Este modo se inicia com a definição dos parâmetros de usinagem na subunidade primária, e depois a subunidade hidráulica é acionada. O próximo passo é ligar os rebolos de arraste e de corte, e por último, acionar a subunidade de lubrificação. Feito isso, todo o sistema deve permanecer em modo de espera por 10 min, até que todo o sistema entre em estado de equilíbrio com as condições do ambiente;
- **Espera:** modo no qual a retificadora está pronta para iniciar a usinagem do material. Todas as subunidades acionadas no modo de iniciação estão ativas. Este modo de operação ocorre em três momentos distintos: 1) logo após o modo de iniciação da máquina ter sido finalizado até a inserção e o ajuste do material para usinagem; 2) imediatamente após a retificação, a contar da retirada da peça usinada e a colocação da próxima peça para usinagem; e 3) antes e após a realização do modo de dressagem. O tempo de espera adotado para os experimentos foi de 30 s para cada respectiva situação 1), 2) e 3);

- **Dressagem:** análogo ao modo de espera, porém, a subunidade de dressagem do rebolo de corte é ativada. As condições de dressagem avaliadas neste trabalho são apresentadas no Quadro 10. Já a subunidade de dressagem do rebolo de arraste não foi avaliada neste estudo;
- **Retificação:** este modo de operação ocorre sempre após ter sido finalizado o modo de espera. Todas as subunidades da máquina estão ativas, à exceção das subunidades de dressagem dos rebolos de corte e de arraste. De acordo com a fabricante de válvulas, o tempo total de usinagem adotado na retificação foi de 4 s, sendo 1 s o tempo de *sparkout*¹⁴.
- **Desligamento:** modo de operação no qual todas as subunidades da retificadora são desligadas. O processo de desligamento da máquina é contrário ao processo de iniciação, logo, a primeira subunidade a ser desativada é a de lubrificação, seguida dos rebolos de corte, arraste, unidade hidráulica e subunidade primária. O tempo de espera total adotado para o desligamento completo de todas as subunidades foi de 2,5 min.

Parâmetros de processo selecionados	Unidade	Faixa de operação		
Número de passes na dressagem	-	2	4	6
Vazão de fluido de corte	l/min	18,0	26,0	36,0
Velocidade de corte na dressagem	cm/s	0,3	0,8	1,6

Quadro 10– Parâmetros de processo estudados no processo de retificação *centerless*
Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 10, vazão de fluido de corte, velocidade de corte e número de passes na dressagem do rebolo de corte foram as variáveis estudadas. De acordo com as informações coletadas durante as visitas técnicas na fabricante de válvulas, esses parâmetros apresentam uma forte influência sobre o consumo de energia e consumo de fluido na usinagem, além de influenciarem diretamente nas propriedades físico-mecânicas das peças usinadas.

Em relação às válvulas automotivas estudadas, cada válvula apresentava diâmetro inicial da haste de 5,8 mm, e comprimento nominal de retificação de 80,0 mm. O diâmetro final almejado à haste usinada era de 5,6 mm com tolerância de $\pm 0,02$ mm.

A partir do Quadro 10, notam-se 27 condições experimentais (3 x 3 x 3). Cada condição experimental foi repetida quatro vezes durante os testes. Assim, ao todo foram executados 108 experimentos (3 x 3 x 3 x 4). Para cada experimento, foi realizado o monitoramento dos principais aspectos ambientais envolvidos na retificação, considerando os cinco modos de operação e as sete subunidades da retificadora. Os aspectos ambientais monitorados foram: consumo de **eletricidade**, e o consumo de **fluido de corte**. A escolha desses aspectos

¹⁴ Tempo de *sparkout* ou tempo de centelhamento ou faiscamento é a fase da retificação onde não mais ocorre o avanço do rebolo sobre a peça usinada. Porém, o rebolo permanece em operação até que o eixo porta-rebolo se recupere de sua deformação elástica (MARINESCU et al., 2007).

ambientais ocorreu em consequência dos resultados da aplicação do procedimento de *GM* no estudo de caso que será discutido na seção 4.2.2.

O consumo de eletricidade (em kJ) foi monitorado em função do estudo de potência da retificadora. Para isso, foi utilizado o medidor digital portátil ANALYST 3Q, marca LEM CE, modelo EO 0600G, e com precisão de 0,1 W. Esse equipamento foi instalado no quadro elétrico da retificadora (ver Figura 32) para a coleta dos dados de corrente e de tensão elétrica nas três fases da máquina, em função das subunidades e dos modos de operação estudados. O medidor digital automaticamente possui a função de converter os dados de corrente e tensão em potência elétrica total (em W). Para cada modo de operação e subunidade, o tempo de experimento (em s) foi medido utilizando-se um cronômetro digital. Assim, multiplicando-se os resultados de potência e de tempo foram calculados os consumos de eletricidade.

Figura 32 – Sistema de monitoramento do consumo de eletricidade no processo de retificação *centerless*. 1) sistema completo instalado; 2) visão geral do analisador digital portátil; 3) detalhe das sondas de amostragem de corrente elétrica.

Fonte: LAPRAS-NUMA-EESC-USP (2015)

Quanto ao monitoramento do consumo de lubrificante, a vazão de fluido foi controlada utilizando-se os controladores manuais do item 11 da Figura 30. Para garantir que as vazões apresentadas no Quadro 10 fossem corretamente empregadas nos testes, foram feitas marcações nos controladores de vazão da retificadora.

Após a usinagem das peças e o monitoramento do processo de retificação, cada válvula foi ensaiada para determinação de seus RTQP, conforme detalhes na Figura 33.

Figura 33 – Resumo dos ensaios físico-mecânicos realizados para as válvulas automotivas.

Fonte: LAPRAS-NUMA-EESC-USP (2015)

- **Circularidade RONT da haste:** a circularidade foi medida em nove pontos ao longo da haste de cada válvula, e a média aritmética das medições foi calculada. O RONT determina a maior relação pico-vale das ovalizações existentes na forma da haste das peças usinadas. As medições de circularidade foram feitas utilizando o medidor de forma marca Taylor Hobson, modelo Talyround 131, integrado a um computador disponível no LAPRAS-NUMA-EESC-USP. O valor máximo esperado de RONT após a retificação foi de $10,0\mu\text{m}$;
- **Diâmetro final da haste:** medida do diâmetro final da haste usinada. Neste trabalho, cada válvula apresentava diâmetro inicial nominal de 5,80 mm, e diâmetro final esperado de 5,62 mm (sobremetal de 0,18 mm). Para as medições de diâmetro foi utilizado o micrômetro marca Mitutoyo 0-25 mm, sendo que cada peça foi medida em três pontos distintos;
- **Rugosidade média (Ra) da haste:** representa uma medida do erro microgeométrico de uma peça devido à existência de saliências e reentrâncias superficiais na mesma. No presente trabalho, a Ra foi determinada utilizando o rugosímetro portátil digital, marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 25, e segundo a norma NBR 6405/1988. A Ra máxima esperada para os experimentos delineados foi de $0,5\mu\text{m}$, sendo que os resultados experimentais foram obtidos pela média aritmética de três medições de rugosidade por peça usinada.

4. RESULTADOS

Na seção 4.1 são apresentados os resultados do processo de desenvolvimento teórico do procedimento de *GM*. Já ao longo da seção 4.2 são apresentados os resultados da sua aplicação prática para cada estudo de caso definido, sendo que a seção 4.2.1 aborda o estudo na indústria madeireira de painéis de madeira, enquanto que a seção 4.2.2 descreve o estudo de caso na indústria automotiva de válvulas para motor. Finalmente, na seção 4.3 são apresentadas algumas versões simplificadas para o procedimento de *GM* desenvolvido.

4.1. Resultados do processo de desenvolvimento do procedimento de *GM*

4.1.1. Análise das proposições teóricas

Uma primeira análise dos artigos selecionados durante a realização da pesquisa bibliográfica é apresentada no Quadro 11, com base nos critérios **abrangência** e **objetivo**.

Sobre o critério **abrangência**, foi constatado que dos 36 artigos, 23 desenvolveram proposições teóricas com foco somente sobre a etapa de manufatura. Isso indica que a maior parte dos estudos enxerga a *GM* como um conceito que possibilita a melhoria ambiental de processos de fabricação, mas sem levar em conta a possibilidade da redução de impactos também sobre outras etapas do CVP. Esses estudos que não integraram a visão de CVP em seu escopo, em geral, se tratam de propostas baseadas nas etapas de aplicação da P+L como fora apresentado na Figura 20 da seção 2.5.

Ainda sobre a **abrangência**, 12 artigos analisaram a etapa de manufatura como um *black-box*, enquanto que 24 artigos realizam estudos direcionados por operação. Assim, a maior parte desses artigos focou em algum tipo específico de operação de manufatura, com destaque para os estudos envolvendo processos de usinagem (e.g., retificação, torneamento, fresamento).

	Autoria	Abrangência		Objetivo do instrumento gerencial
1	SARKIS (1999)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	▪ Propor uma metodologia para a seleção de alternativas tecnológicas de <i>GM</i> , com base na aplicação das ferramentas <i>ANP</i> e <i>DEA</i> .
2	CURKOVIC (2003)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	▪ Desenvolver e testar um modelo teórico de <i>ERM</i> gerado a partir de conceitos do TQM e de resultados de uma <i>survey</i> aplicada junto ao setor industrial.
3	NARITA, KAWAMURA e NORIHISA (2006)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Desenvolver um sistema de predição de impactos ambientais em tempo real de produção e aplicá-lo num estudo de usinagem por fresamento.
4	JESWIET e KARA (2008)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	▪ Propor a ferramenta CES TM para quantificar as emissões de CO ₂ devido ao consumo de eletricidade em processos de manufatura (torneamento e forjamento).
5	TAN et al. (2008)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	▪ Desenvolver e aplicar um modelo multicritério <i>fuzzy</i> para a seleção de ferramentas de usinagem ambientalmente mais adequadas.
6	ARAUJO (2010)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	▪ Desenvolver um método para a avaliação de desempenho em sustentabilidade de processos de manufatura (retificação e torneamento).
7	LI et al. (2010a)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	▪ Apresentar uma combinação entre as ferramentas análise <i>SWOT</i> e o <i>AHP</i> para a seleção de estratégias de <i>GM</i> .
8	LI et al. (2010b)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	▪ Propor uma metodologia para a seleção de portfólio de tecnologias verdes de manufatura com base na aplicação da ferramenta <i>ANP</i> .
9	SHAO e KIBIRA (2010)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Desenvolver um sistema com base em <i>DQGL</i> para a quantificação de métricas de sustentabilidade num processo de usinagem.
10	YAN e FEI (2010)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	▪ Apresentar uma metodologia para quantificar o consumo de eletricidade e os seus impactos ambientais gerados em três tipos de processos por fresamento.
11	DEIF (2011)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	▪ Apresentar um modelo de sistema de <i>GM</i> e aplicá-lo num processo industrial de pintura de janelas persianas.
12	OECD DSTI (2011)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	▪ Propor uma metodologia para a avaliação de processos de manufatura com base no ciclo PDCA e num conjunto de boas práticas resumidas em sete etapas.
13	BEHRENDT et a. (2012)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	▪ Desenvolvimento de um procedimento para monitorar o consumo de energia em máquinas-ferramenta.
14	DESPEISSE et al. (2012a)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	▪ Propor uma metodologia para aplicação de conceitos da Ecologia Industrial em nível de processos de fabricação.

15	DESPEISSE et al. (2012b)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Propor um modelo conceitual para visualização da etapa de manufatura como um ecossistema, com base em conceitos da Ecologia Industrial.
16	JIANG, ZHANG e SUTHERLAND (2012)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Descrever um método para a avaliação ambiental do planejamento de processos de fabricação com base na Matriz de Leopold e o <i>AHP</i>, aplicados num estudo envolvendo diversos processos de usinagem.
17	JOUNG et al. (2012)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	<ul style="list-style-type: none"> Descrever um método para a utilização de um repositório internacional de indicadores de manufatura sustentável.
18	KELLENS et al. (2012a)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Propor uma metodologia orientada à ACV para a análise sistemática de inventários relacionados à fase de uso de processos de manufatura.
19	SMITH e BALL (2012)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Propor um conjunto de etapas para o mapeamento do ciclo de vida de materiais, energia e resíduos gerados em processos de fabricação.
20	CERINŠEK et al. (2013)	Visão sobre o CVP	Análise <i>black-box</i>	<ul style="list-style-type: none"> Identificar fatores-chave e desenvolver uma metodologia para permitir a rápida inserção da manufatura sustentável na Educação em Engenharia.
21	JAIN et al. (2013)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Propor uma metodologia baseada no ciclo <i>PDCA</i> e em modelos de melhoria contínua para subsidiar a manufatura sustentável.
22	LARREINA et al. (2013)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Apresentar o sistema <i>SMES</i> de simulação e medição de indicadores de sustentabilidade na manufatura em tempo real de fabricação. O sistema foi aplicado num processo de usinagem.
23	SUBIC et al. (2013)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	<ul style="list-style-type: none"> Analisar uma ferramenta para a avaliação da capacidade de <i>GM</i> de indústrias, tomando como base sua aplicação numa fabricante de vestuário esportivo.
24	TSAI et al. (2013)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	<ul style="list-style-type: none"> Apresentar um modelo para a seleção de tecnologias verdes de manufatura baseado em Teoria das Restrições, método ABC e Programação Inteira-Mista.
25	VIKHOREV, GREENOUGH e BROWN (2013)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Propor uma metodologia para o monitoramento e gestão do consumo de energia em tempo real de produção em processos de fabricação.
26	ZHANG; CALVO-AMODIO e HAAPALA (2013)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	<ul style="list-style-type: none"> Desenvolver um modelo conceitual para assistir a Manufatura Sustentável através de Sistemas Dinâmicos.
27	GARBIE (2014)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	<ul style="list-style-type: none"> Desenvolver um sistema que possa calcular um índice de sustentabilidade de indústrias. O índice de sustentabilidade foi aplicado num estudo de caso numa fábrica extrusora de alumínio.

28	JIN e NOH (2014)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise por operação	▪ Desenvolver uma metodologia para avaliar investimentos em tecnologias de <i>GM</i> . A metodologia foi testada em dois casos de fabricação de variadores de velocidade para motores.
29	LEE e LEE (2014)	Visão sobre a etapa de manufatura	Análise <i>black-box</i>	▪ Desenvolver um sistema de pesquisa bibliográfica focado na seleção de artigos sobre avaliação de sustentabilidade em processos de manufatura.
30	Lee, Kang e Noh (2014)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Desenvolver o sistema MAS ² para a simulação e avaliação de processos de manufatura por meio do cálculo de indicadores de manufatura sustentável.
31	ZENDOIA et al. (2014)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Propor um método para o ICV de máquinas-ferramenta e sua demonstração prática em dois estudos de caso.
32	EASTWOOD e HAAPALA (2015)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Desenvolver uma metodologia de avaliação de sustentabilidade na manufatura de produtos.
33	KIM et al. (2015)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Descrever um guia de orientação para a análise do desempenho em sustentabilidade de processos de fabricação, a partir da técnica de ACV.
34	SHIN et al. (2015)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Desenvolver um <i>framework</i> baseado na ACV para avaliar processos de manufatura.
35	SPROEDT et al. (2015)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Propor um sistema para avaliação e melhoria ambiental de processos de manufatura a partir do emprego da técnica de ACV.
36	ZHAO et al. (2015)	Visão sobre o CVP	Análise por operação	▪ Apresentar um <i>framework</i> para simular o consumo de energia em indústrias de manufatura a partir da visão de CVP.

Quadro 11 – Lista de proposições teóricas – abrangência e objetivo

Fonte: elaborado pelo autor

Sobre os **objetivos** dos artigos eles foram diversos, porém, todos enquadrados dentro das definições de *GM* ou de Manufatura Sustentável da seção 2.5.1. Houveram autores que propuseram sistemas computacionais para subsidiar a *GM*, seja por meio da simulação de processos de manufatura (GARBIÉ, 2014; LARREINA et al., 2013; LEE; KANG; NOH, 2014; SPROEDT et al., 2015), ou por meio do monitoramento de processos de fabricação em tempo real (NARITA; KAWAMURA; NORIHISA, 2006; SHAO; KIBIRA, 2010; ZHAO et al., 2015). A maior parte desses sistemas integraram a visão de CVP e o uso da ACV.

Houveram propostas com objetivos diferentes, por exemplo, Jin e Noh (2014), Li et al. (2010b), Sarkis (1999), Tan, Liu e Li (2008), e Tsai et al. (2013) focaram no desenvolvimento de metodologias para a seleção de tecnologias de manufatura. Li et al. (2010a) desenvolveram uma ferramenta para a seleção de estratégias de *GM*. Já Cerinšek et al. (2013) identificaram diversos fatores-chave que podem facilitar a inserção mais rápida do conceito de Manufatura Sustentável nos cursos de educação em Engenharia. Lee e Lee (2014) propuseram um sistema de busca por publicações científicas envolvendo o tema de Manufatura Sustentável. Portanto, como o objetivo desta tese foi em desenvolver um procedimento para a avaliação e monitoramento ambiental de processos de manufatura, os artigos de Cerinšek et al. (2013), Jin e Noh (2014), Lee e Lee (2014), Li et al. (2010a,b), Sarkis (1999), Tan, Liu e Li (2008), e Tsai et al. (2013) mostram-se fora do escopo. Assim, as demais 28 proposições teóricas foram a seguir classificadas segundo o critério de **objetivo e escopo** nos Quadros 12 e 13.

Como o **objetivo** de cada proposição teórica já foi previamente abordado no Quadro 11, o Quadro 12 mostra apenas os aspectos e impactos ambientais avaliados pelos 28 artigos remanescentes, e a relação desses com o uso da ACV. Já no Quadro 13 é realizada uma classificação dos artigos conforme as etapas de aplicação de cada proposição teórica.

Pelo Quadro 12 o aspecto ambiental mais estudado foi o consumo de energia, com destaque para o consumo de eletricidade. O consumo de eletricidade está em destaque nos estudos de *GM* pelo fato de ser essencial para a realização das atividades de manufatura, seja no acionamento e operação de máquinas-ferramenta ou de seus sistemas auxiliares (e.g., robôs, sistemas de transporte, comunicação, etc.). Já os aspectos ambientais menos estudados foram às emissões a água, em geral, caracterizadas pela geração de efluentes líquidos. Sobre o consumo de materiais, a maior parte dos artigos estudou o consumo de água, fluido de corte, lubrificantes, óleo hidráulico e ar comprimido. Sobre as emissões ao ar, o destaque foi para a geração de GEE emitidos diretamente ou indiretamente nos processos produtivos. E sobre as emissões ao solo, o destaque foi para a geração de resíduos sólidos, principalmente a geração de cavacos de materiais metálicos provenientes de processos de usinagem.

Outro destaque a partir do Quadro 12 é que a maior parte dos artigos não correlacionaram os aspectos ambientais junto aos seus impactos potenciais sobre o meio

ambiente, à exceção dos estudos de Eastwood e Haapala (2015), Jeswiet e Kara (2008), Kim et al. (2015), Narita, Kawamura e Norihisa (2006), Shao e Kibira (2010), Smith e Ball (2012), Sproedt et al. (2015), e Zendoia et al. (2014). Todos estes autores consideraram **somente** os impactos para a categoria de **Aquecimento Global**, à exceção de Kim et al. (2015) e Zendoia et al. (2014) que incluíram também outras categorias de impacto relevantes em seus estudos.

A exclusão do cálculo dos impactos ambientais do escopo da maioria dos estudos avaliados no Quadro 12 se mostra uma limitação, pois a qualidade do meio ambiente é afetada não pelos aspectos ambientais, mas sim, pelos impactos gerados. Assim, as sugestões de melhorias ambientais propostas por esses artigos podem não ser as mais indicadas se forem calculados os impactos potenciais associados.

Pelos resultados do Quadro 12 nota-se que 13 dos 28 artigos avaliados consideraram a ACV. Porém, os autores Deif (2011), Despeisse et al. (2012a,b) e OECD DSTI (2011) apenas citaram a ACV, mas não mostraram como utilizá-la dentro das etapas de aplicação de suas proposições teóricas. Já as publicações que mostraram como utilizar a ACV em suas propostas, em sua maioria foram as já citadas no Quadro 11 por incluírem a visão de CVP.

Sobre os artigos que não incluíram a ACV em suas propostas, tratam-se na maioria dos casos de trabalhos baseados na metodologia de P+L, conforme será discutido a seguir no Quadro 13. No Quadro 13, as etapas de aplicação dos proposições teóricas foram organizadas em grupos: **planejamento, coleta de dados, análise de resultados, implementação das melhorias, e melhoria contínua.**

Autoria	Consumo de recursos materiais	Consumo de recursos energéticos	Emissões ao ar	Emissões a água	Emissões ao solo	ACV	Categorias de impacto ambiental estudados
CURKOVIC (2003)	X	X	X	X	X	Não	Nenhuma
NARITA, KAWAMURA e NORIHISA (2006)	X	X	X	-	X	Sim	▪ Aquecimento global
JESWIET e KARA (2008)	-	X	-	-	-	Não	▪ Aquecimento global
ARAUJO (2010)	X	X		X	X	Não	Nenhuma
SHAO e KIBIRA (2010)	X	X	X	X	X	Sim	▪ Aquecimento global
YAN e FEI (2010)	-	X	X	X	X	Não	Nenhuma
DEIF (2011)	X	X	X	X	X	Sim	Nenhuma
OECD DSTI (2011)	X	X	X	X	X	Sim	Nenhuma
BEHRENDT et al. (2012)	-	X	-	-	-	Não	Nenhuma
DESPEISSE et al. (2012a)	X	X	X	X	X	Sim	Nenhuma
DESPEISSE et al. (2012b)	X	X	X	X	X	Sim	Nenhuma
JIANG, ZHANG e SUTHERLAND (2012)	X	X	X	X	X	Não	Nenhuma
JOUNG et al. (2012)	X	X	X	X	X	Não	Nenhuma
KELLENS et al. (2012a)	X	X	X	X	X	Sim	Nenhuma
SMITH e BALL (2012)	X	X	X	X	X	Não	▪ Aquecimento global
JAIN et al. (2013)	X	X	X	-	-	Não	Nenhuma
LARREINA et al. (2013)	-	X	-	-	-	Não	Nenhuma
SUBIC et al. (2013)	X	X	X	-	X	Não	Nenhuma
VIKHOREV, GREENOUGH e BROWN (2013)	-	X	-	-	-	Não	Nenhuma
ZHANG; CALVO-AMODIO e HAAPALA (2013)	X	X	X	X	X	Não	Nenhuma
GARBIE (2014)	X	X	X	X	X	Não	Nenhuma
LEE, KANG e NOH (2014)	X	X	-	-	X	Sim	Nenhuma

ZENDOIA et al. (2014)	X	X	X	X	X	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acidificação ▪ Aquecimento global ▪ Depleção de ozônio
EASTWOOD e HAAPALA (2015)	X	X	X	X	X	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aquecimento global
KIM et al. (2015)	X	X	X	X	X	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acidificação ▪ Aquecimento global ▪ Depleção de ozônio ▪ Ecotoxicidade ▪ Eutrofização ▪ Oxidação fotoquímica ▪ Toxicidade humana ▪ Uso do solo
SHIN et al. (2015)	X	X	X	-	X	Sim	Nenhuma
SPROEDT et al. (2015)	X	X	X	X	X	Sim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aquecimento global
ZHAO et al. (2015)	X	X	X	X	X	Não	Nenhuma

Quadro 12 – Lista de proposições teóricas de *GM* – escopo: relação com os aspectos e impactos ambientais

Fonte: elaborado pelo autor

[illegible]

Quadro 13 – Lista de proposições teóricas de *GM* – escopo: etapas de aplicação

Fonte: elaborado pelo autor

Analisando o Quadro 13 verifica-se que:

- Os grupos **planejamento** e **coleta de dados** foram os únicos que apresentaram etapas de aplicação contempladas por todos as 28 proposições teóricas analisados. Já o grupo de **melhoria contínua** foi o menos estudado, tendo sido assumido somente por Deif (2011), Joung et al. (2012), OECD DSTI (2011) e Sproedt et al. (2015);
- O uso de diagramas ilustrativos para mapear os fluxos de materiais e de energia que entram e que saem dos processos produtivos estudados foi um destaque no grupo **planejamento**, sendo o **Diagrama de Fluxo de Processo (DFP)**¹⁵ a principal ferramenta. Autores como Despeisse et al. (2012b), Jiang, Zhang e Sutherland (2012), OECD DSTI (2011), Shao e Kibira (2010), Shin et al. (2015), e Zendoia et al. (2014) utilizaram o DFP segundo a metodologia de P+L. Já Kellens et al. (2012a) e Kim et al. (2015) utilizaram o DFP para explorar processos produtivos em nível de suas subunidades e dos diversos modos de operação ali existentes. A utilização de **Diagramas de Sankey** (uma variação do DFP), também foi destaque nas publicações de Behrendt et al. (2012) e Despeisse et al. (2012a);
- Sobre o **planejamento**, prevaleceu a adoção de etapas similares às das metodologias de P+L e de ACV. Por exemplo, a “*pré-avaliação da empresa*”, o “*mapeamento dos fluxos dos processos produtivos*”, e a “*definição de indicadores de desempenho*” são etapas comuns dentro da P+L. Já a etapa de “*definição de objetivo e escopo*” foi proposta com base na ACV pelos trabalhos de Araújo (2010), Eastwood e Haapala (2015), Kellens et al. (2012a), Kim et al. (2015), Shin et al. (2015) e Zhang, Calvo-Amodio e Haapala (2013). Como etapas distintas das existentes nas metodologias de P+L e de ACV, há a “*definição de princípios de manufatura sustentável*”, a “*definição de processos e máquinas*” e a “*seleção dos parâmetros de processo de interesse*”;
- Dentro do grupo **planejamento**, a etapa de “*definição de princípios de manufatura sustentável*”, no âmbito ambiental, consistiu principalmente no estabelecimento de medidas proativas de gestão ambiental, as quais poderiam ser estudadas pelas empresas interessadas na GM. Tais medidas seguem o conteúdo já discutido na seção 2.5 a partir da Figura 18. Todavia, uma limitação é que como as atividades nesse momento ainda estão em fase planejamento, pode não haver informações suficientes para a realização da mesma. Este raciocínio também pode ser válido para a etapa de “*seleção de indicadores de desempenho de interesse*”, pois a escolha de indicadores adequados pode se mostrar precoce neste momento;
- Ainda sobre o grupo **planejamento**, na maioria dos casos, os artigos que assumiram a etapa de “*definição de processos e máquinas*” também incluíram a “*seleção dos parâmetros de processo de interesse*”, o que indica uma forte relação entre as etapas. Porém, as

¹⁵ Para Jacquemin et al. (2012), se trata de um esquema que representa os fluxos de materiais, energia, resíduos e as operações e equipamentos utilizados no processo de fabricação de uma planta industrial.

publicações avaliadas não apresentaram formas ou ferramentas para o processo de seleção dos processos e máquinas a serem estudados, o que é uma limitação. Afinal, numa indústria de manufatura pode haver dezenas de processos produtivos realizando outras dezenas de operações, portanto, é desejável um estudo prévio para a seleção adequada dos processos produtivos mais relevantes em termos de necessidade de melhoria ambiental em prol da *GM*;

- Analisando o grupo **coleta de dados**, a principal etapa seria a “*quantificação dos aspectos ambientais escolhidos*”, com destaque para o consumo de eletricidade e a geração de GEE. Esses aspectos devem ser previamente definidos ainda no **planejamento**, tendo em vista o objetivo e escopo do estudo. Por outro lado, como já discutido, a maior parte dessas proposições teóricas assumiram somente a quantificação dos aspectos e não dos impactos ambientais, e os que consideraram a questão do impacto ambiental o fizeram na maioria dos casos somente para a categoria de PAG. Há diversas outras categorias de impacto que também deveriam ser estudadas, por exemplo, as previamente citadas na Quadro 4 da seção 2.4.3;
- No grupo **coleta de dados**, o estudo dos fluxos indiretos devido aos aspectos ambientais monitorados na manufatura, foi realizado por Kim et al. (2015), Lee, Kang e Noh (2014), Shao e Kibira (2010), Shin et al. (2015), Sproedt et al. (2015), e Zendoia et al. (2014). Esses autores também se destacaram por terem utilizado a ACV em suas propostas, sendo que, em geral, os fluxos indiretos foram obtidos por meio do uso de softwares e bancos de dados específicos. Já os fluxos indiretos de infraestrutura (i.e., fluxos associados à construção das máquinas e equipamentos industriais) foram abordados apenas pelo estudo de Zendoia et al. (2014). Isso se deve a basicamente dois fatores: 1) complexidade na quantificação de tais fluxos, visto que uma máquina industrial pode ser composta por centenas de componentes distintos; e 2) pelo fato de ser assumido como pouco significativo o impacto ambiental associado comparativamente ao da fase de uso dessas máquinas e equipamentos (DAHMUS; GUTOWSKI, 2004). Porém, Chester et al. (2013), Diaz et al. (2010), Santos et al. (2011) e Zendoia et al. (2014) contrariam esse raciocínio, ressaltando que essa questão pode variar de acordo com as características do ambiente fabril (e.g., nível de automação industrial, vida útil e as estratégias de fim de vida dos componentes que integram o maquinário industrial);
- Também verificou-se na **coleta de dados** que os autores Larreina et al. (2013), Narita, Kawamura e Norihisa (2006), Shao e Kibira (2010), e Vikorev, Reenough e Brown (2013) realizaram propostas para que os aspectos ambientais fossem monitorados em tempo real de produção nos processos de manufatura. A justificativa para isso esteve embasada no fato do consumo de recursos não ser constante na manufatura, mas sim variável. Assim, monitorando-se em tempo real os aspectos ambientais de interesse seria possível obter dados instantâneos e com menor nível de incerteza. Nesta tese, a ideia de monitoramento de aspectos ambientais em tempo real de produção foi realizada segundo a pesquisa experimental da seção 3.2.3;

- A etapa “*Avaliação das operações e dos sistemas auxiliares utilizados na manufatura*” também foi destaque na **coleta de dados**. Os artigos realizaram a quantificação dos aspectos ambientais segundo os modos de operação e as subunidades dos processos de fabricação, com destaque para o emprego da metodologia UPLCI (EASTWOOD e HAAPALA, 2015; KELLENS et al., 2012a; KIM et al., 2015; SHAO; KIBIRA, 2010; SHIN et al., 2015);
- Para a **análise de resultados**, os artigos exaltaram as seguintes etapas: “*análise para identificar oportunidades de melhorias nos processos de manufatura*” e “*busca por oportunidades de melhoria para os processos de manufatura críticos*”. Essas etapas mostram-se semelhantes em termos de seu significado semântico, e se baseiam principalmente na aplicação de balanços de massa e de energia (DEIF, 2011; DESPEISSE et al., 2012a; OECD DSTI, 2011) e/ou no uso da ACV (DEIF, 2011; DESPEISSE et al., 2012a) para a identificação dos *hotspots* ambientais. Contudo, uma limitação é que esses estudos não incluíram uma análise de contribuição da etapa de manufatura para com os impactos ambientais a montante e a jusante no CVP, conforme a discussão feita na seção 2.3;
- Sobre a **implementação de melhorias**, os estudos de Behrendt et al. (2012), Deif (2011), Despeisse et al. (2012a,b), Joung et al. (2012), Kim et al. (2015), OECD DSTI (2011), Shin et al. (2015), Smith e Ball (2012), e Subic et al. (2013) realizaram propostas. A principal etapa foi a “*implementação e avaliação das melhorias junto ao sistema de manufatura*”, que consiste em por em prática as oportunidades de melhoria identificadas, e a avaliação das mesmas para acompanhamento do seu efeito sobre a indústria de manufatura como um todo;
- O grupo **melhoria contínua** foi estudado apenas pelos artigos de Deif (2011), Joung et al. (2012), OECD DSTI (2011), e Sproedt et al. (2015). A execução das etapas deste grupo se assemelha com a metodologia de P+L. Nessa linha, Joung et al. (2012) exaltaram o uso de indicadores de desempenho que permitam quantificar os aspectos ambientais diretamente afetados pelas melhorias realizadas nos processos de fabricação;
- Finalmente, é importante enfatizar sobre o emprego de diversas ferramentas de apoio durante a condução de cada uma das etapas de cada grupo do Quadro 13. Além do uso da ACV, DFP, balanços de massa e de energia, e de outras ferramentas previamente discutidas, há estudos que adotaram ferramentas da área de Gestão da Qualidade, como as Sete Ferramentas Básicas da Qualidade, e as Sete Ferramentas Gerencias, conforme detalhamento realizado por Carpinetti (2012), Silva et al., (2013a), e Tague (2004). Entre as Sete Ferramentas Básicas da Qualidade destacaram-se a utilização do **Diagrama Causa-Efeito** (SHIN et al., 2015; SMITH e BALL, 2012; SPROEDT et al., 2015), **Gráfico de Pareto** (ARAÚJO, 2010; SMITH e BALL, 2012), e **Folha de Verificação** (ARAÚJO, 2010; BEHRENDT et al., 2012; CURKOVIC, 2003; DESPEISSE et al., 2012a; JOUNG et al.,

2012; KIM et al., 2015), especialmente para a execução das etapas dos grupos **planejamento e coleta de dados**. Sobre as Sete Ferramentas Gerenciais, destacaram-se: **Diagrama de Relações** (SHIN et al., 2015; LEE; KANG; NOH, 2014; ZENDOIA et al., 2014), **Diagrama em Árvore** (SHIN et al., 2015), **Diagrama de Processo Decisório** (ARAÚJO, 2010; DEIF, 2011; DESPEISSE et al., 2012a; JOUNG et al., 2012; KIM et al., 2015, OECD DSTI, 2011, SHIN et al., 2015; SMITH; BALL, 2012; SPROEDT et al., 2015), e **Matriz de Priorização** (ARAÚJO, 2010; EASTWOOD; HAAPALA, 2015; JAIN et al., 2013; JOUNG et al., 2012; OECD DSTI, 2011; SHIN et al., 2015; SMITH e BALL, 2012; SPROEDT et al., 2015; SUBIC et al., 2013; VIKHOREV; GREENOUGH; BROWN, 2013), empregadas no grupo **análise de resultados**. Outras ferramentas da Gestão da Qualidade também utilizadas foram o **Brainstorming** (SMITH; BALL, 2012), a **Estratificação** (KIM et al., 2015; LEE; KANG; NOH, 2014; SHIN et al., 2015; JOUNG et al., 2012; ZENDOIA et al., 2014), a **Matriz GUT** (ARAÚJO, 2010; OECD DSTI, 2011), e o **Planejamento de Experimentos** (BEHRENDT et al., 2012; SHIN et al., 2015). Nesta tese, essas ferramentas também foram aproveitadas durante a proposta do novo procedimento de *GM*.

Por fim, como último critério de análise das 28 proposições teóricas, a seguir, é realizada uma síntese das principais **limitações** de cada publicação:

- Limitação na inclusão da visão completa de CVP, pois a maioria dos estudos focou somente na etapa de manufatura;
- Limitação quanto ao emprego da ACV, pois muitos estudos focaram somente no ICV e não incluíram a AICV. Além disso, há estudos que citaram o uso da ACV, mas não mostraram como utilizar a técnica nas suas proposições;
- Muitos estudos não incluíram em seu escopo a quantificação dos fluxos indiretos de manufatura, principalmente aqueles advindos da construção do maquinário industrial;
- Falta de um procedimento para a seleção dos processos de manufatura mais relevantes. Os artigos que analisaram a manufatura, por exemplo, em operações de usinagem, não apontaram um procedimento para subsidiar essa escolha. Assim, não há garantia de que as operações analisadas sejam as mais relevantes dentro da etapa de manufatura como todo;
- Muitos estudos assumiram a etapa de manufatura como um *black-box*, o que dificulta a realização de uma análise mais completa, por exemplo, em nível das operações de manufatura e das subunidades existentes (e.g., máquina-ferramenta, sistemas auxiliares);
- Apenas uma minoria das proposições teóricas assumiram o grupo de melhoria contínua;
- Nenhum dos artigos analisou como que a etapa de manufatura poderia influenciar os impactos ambientais nas etapas de uso e de pós-uso dos produtos manufaturados.

Diante dessas limitações expostas, foi desenvolvido nesta tese um novo procedimento de *GM* para superar tais barreiras, conforme será discutido a seguir.

4.1.2. Procedimento de *GM* proposto nesta tese

Primeiramente, esta tese propõe uma definição diferente para *GM*, tomando como base as propostas de Curcovic (2003), Deif (2011), Gungor e Gupta (1999) e NIST (2014), que incluíram a visão de CVP (rever Quadro 5 da seção 2.5.1). Assim:

- *Green manufacturing é promover a melhoria ambiental do CVP por meio da melhoria contínua dos processos de manufatura ambientalmente mais relevantes.*

Esta definição é diferente das identificadas na literatura, pois: 1) estabelece que o foco deva estar centrado nos processos de fabricação mais relevantes/críticos da indústria, ou seja, aqueles processos que contribuam com a maior parcela dos impactos ambientais; e 2) introduz a ideia de melhoria contínua para a promoção de melhorias ambientais no CVP.

Assim, o procedimento proposto foi organizado em três macroetapas na Figura 34, e cada macroetapa é composta por um conjunto de etapas conforme detalhamento na Figura 35. A macroetapa de **pré-avaliação** é composta por quatro etapas, a **avaliação e monitoramento ambiental** integra também quatro etapas do procedimento, e a **pós-avaliação** conta com duas etapas, conforme detalhes descritos nos parágrafos que seguem.

Figura 34 – Macroetapas do procedimento proposto
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 35 – Etapas para aplicação do procedimento proposto
 Fonte: elaborado pelo autor

Cada etapa da Figura 35 foi proposta segundo os grupos **planejamento, coleta de dados, análise de resultados, implementação das melhorias, e melhoria contínua**, destacados no Quadro 13 da seção 4.1.1. No grupo planejamento estão as etapas 1 e 5; na coleta de dados estão as etapas 2, 3, 6 e 7; na análise de resultados estão as etapas 4, 8 e 9; já a implementação das melhorias está na etapa 9; e o grupo melhoria contínua está na etapa 10.

Etapa 1: Definição de objetivo e escopo

As etapas de 1 a 4 da **pré-avaliação** apresentam atividades a serem executadas conforme a metodologia de ACV, e também consideram algumas ferramentas auxiliares (e.g., uso de matrizes e de diagramas), como será descrito nos parágrafos que seguem.

Nesta **Etapa 1**, primeiro é necessário selecionar o produto a ser estudado, visto que o procedimento de *GM* proposto nesta tese é orientado ao produto. O uso deste procedimento permite a realização de estudos enquadrados dentro das situações-alvo A, B e C definidas por EC/JRC/IES (2010a). Contudo, seu foco maior está nas situações A e C, pois possibilita, entre outras finalidades, a quantificação e o monitoramento de aspectos e de impactos ambientais (situação-alvo C), e também apoia processos decisórios em nível micro para a situação-alvo A (e.g., redução no consumo de recursos e emissões geradas na manufatura, melhoria nas características de desempenho dos produtos). Já a situação-alvo B não será abordada nesta tese, pois se remete a geração de informações que apoiem processos decisórios em nível macro/meso (e.g., definição de estratégias e de políticas públicas).

Para a seleção do produto a ser estudado, se sugere a utilização da **Matriz de Priorização de Produtos** do Quadro 44 do **Apêndice C**. Esta ferramenta foi desenvolvida com base na Matriz GUT, corriqueiramente aplicada em processos decisórios baseados em julgamento de valores (CARPINETTI, 2012; SILVA et al., 2013a; TAGUE, 2004). Contudo, os critérios da Matriz GUT foram substituídos pelos critérios: representatividade (R), tendência (T), custo de produção (C), e meio ambiente (MA). O produto a ser escolhido será aquele que apresentar o maior valor resultante da multiplicação $R \times T \times C \times MA$. A descrição dos critérios e dos fatores de ponderação utilizados na matriz constam no **Apêndice C**.

Outra ferramenta de uso simples em processos de priorização é o Gráfico de Pareto, contudo, é necessário que hajam dados quantitativos para sua aplicação prática. Smith e Ball (2012) utilizaram o Gráfico de Pareto para a quantificação de aspectos ambientais relacionados ao consumo de materiais, energia e a geração de resíduos em diversos processos de usinagem. Porém, pode ser inviável o uso do Gráfico de Pareto nesta primeira etapa do procedimento de *GM*, pois uma empresa pode fabricar diversos produtos, e assim, a

quantificação dos critérios R, T, C e MA pode se tornar complexa. Por isso, foi sugerido apenas o uso da matriz do Quadro 44 do **Apêndice C**.

Tendo definido o produto a ser estudado, a seguir, são relacionados os principais itens da fase de **Definição de Objetivo e Escopo** da ACV (rever seção 2.4.1) para o contexto de aplicação do procedimento proposto nesta tese:

- **Unidade funcional:** o fluxo de referência (FR) definido na etapa de manufatura do produto deve concretizar a unidade funcional (UF) estabelecida para o estudo. Na etapa de manufatura, cada processo elementar definido produz fluxos intermediários (ver Figura 36), os quais ao término das atividades de fabricação irão resultar numa certa quantidade FR de produto acabado, que por sua vez deverá representar a UF estabelecida;
- **Sistema de produto:** um sistema de produto completo é do tipo *cradle-to-grave*, sendo que neste procedimento, a etapa de manufatura é tida como seu elemento central. A descrição da etapa de manufatura como um *black-box* deve ser evitada, sendo recomendado o detalhamento de seus processos elementares, por exemplo, por meio do emprego de diagramas como o **DFP** da Figura 36. Para os aspectos ambientais identificados em cada processo elementar de manufatura (fluxos de entrada e de saída), deve-se ainda decidir sobre a inclusão dos seus fluxos indiretos. Em indústrias de manufatura complexas, i.e., que envolvam um grande número de operações de fabricação, a inclusão dos fluxos indiretos para cada processo elementar pode ser inviável, servindo como saída nesses casos, agregar os processos elementares em subsistemas de manufatura;
- **Processo elementar:** cada processo elementar da etapa de manufatura deve representar um tipo de operação (de processamento ou de montagem), sendo que a máquina-ferramenta deve ser o seu objeto central. Deve ser evitado o agrupamento de processos elementares que realizem diferentes operações de manufatura formando assim subsistemas. Porém, no caso de não ser possível evitá-los, durante a **Etapa 5** deste procedimento, cada subsistema de manufatura deverá ser estratificado em nível de processo elementar;
- **Considerações e limitações:** no âmbito de manufatura de produtos, as considerações e limitações do estudo de ACV devem levar em conta itens como: os critérios utilizados para a inclusão/exclusão de dados de fluxos de entrada e de saída, e de processos elementares. No que diz respeito à definição dos processos elementares, eles podem se mostrar mais ou menos agregados em função da disponibilidade de dados. Por exemplo, Dahmus e Gutowski (2004) realizaram a análise de desempenho ambiental de um processo de usinagem de modo desagregado, considerando um conjunto de subunidades: remoção de material, preparo da máquina-ferramenta, fornecimento de fluido de corte, fornecimento de ar comprimido, etc. Enquanto que Pusavec, Kraknik e Kopac (2010), também estudando um processo de usinagem, assumiram no processo elementar somente a subunidade de remoção de material.

Figura 36 – Exemplo de diagrama de fluxo de processo na etapa de manufatura
Fonte: elaborado pelo autor

Uma vez definida a UF, para uma quantidade FR do produto a ser manufaturado, são aplicados **balanços de massa e de energia** para a mensuração dos fluxos de entrada, de saída e dos fluxos intermediários em cada processo elementar da Figura 36. Como destacado na seção 4.1.1, tanto o DFP quanto o emprego de balanços de conservação de matéria estiveram entre as principais ferramentas adotadas pelas proposições teóricas de GM analisadas, e por isso, que nesta tese, elas também foram aproveitadas como ferramentas auxiliaadoras.

Na Figura 36, é importante ressaltar que cada processo elementar entre 1 e n pode ter seu próprio FR. Por exemplo, Iritani et al. (2015) realizaram uma ACV da manufatura de um guarda-roupas de madeira, sendo que o **FR da ACV foi a produção de uma unidade do móvel**. Assumindo como processo elementar 1 da Figura 36 o processo de usinagem dos painéis de madeira que constituem o móvel, identifica-se o consumo de 235,0 kg do painel e entre os fluxos de saída a geração de 29,0 kg de resíduos sólidos (IRITANI et al., 2015). Para este exemplo, pelo balanço mássico, o FR do processo elementar 1 seria a **obtenção de 205,1 kg de painéis de madeira usinados**, sendo que esta quantidade de painéis se remeteria diretamente ao FR do estudo de ACV, i.e., 1 unidade do roupeiro de madeira.

Etapa 2: Inventário do CVP

Tomando o conteúdo já apresentado na seção 2.4.2 sobre os requisitos necessários para a condução de um ICV, a seguir, são elencadas as suas principais características no tocante a etapa de manufatura de produtos, conforme a proposta deste procedimento:

- A partir do Quadro 12 da seção 4.1.1, os fluxos a serem inventariados na manufatura podem ser classificados a seguir, ainda que possa não estar limitado somente a eles:
 - **Elettricidade:** é o principal aspecto ambiental estudado na manufatura de produtos. Além disso, o consumo de energia elétrica também é um dos principais indicadores utilizados para estimar o desempenho ambiental de processos produtivos, juntamente com o cálculo das emissões de equivalentes de CO₂;
 - **Água:** como destacado na seção 2.2.1, o consumo de água na indústria é elevado, sendo mais utilizado em sistemas de refrigeração e na lavagem de máquinas e de equipamentos. Além disso, indiretamente água é consumida devido ao uso de insumos à base d'água (e.g., fluidos de usinagem, lubrificantes, solventes, etc.);
 - **Ar comprimido:** está entre os principais recursos materiais estudados em trabalhos de GM, especialmente devido ao seu alto custo. Para Yuan (2006), muitas vezes o custo do consumo da energia elétrica para operar um sistema de fornecimento de ar comprimido é maior do que o próprio custo do compressor requerido para o sistema;
 - **Fluido de corte:** está associado aos processos de usinagem. O consumo de fluido de corte e de lubrificantes para Weinert (2004) pode contabilizar de 7,0 a 17,0% do custo total de operação de uma indústria;
 - Sobre as emissões, em geral, elas são menos estudadas do que o consumo de recursos na manufatura. O destaque maior ocorre para o inventário das **emissões ao ar de GEEs**. Sobre as emissões a água e ao solo, destacam-se, respectivamente, a geração de **efluentes líquidos** e a geração de **resíduos sólidos** industriais.

- Para os aspectos ambientais supracitados (e para outros que não constarem na lista), é importante que a quantificação do consumo e da geração de resíduos seja feita tendo em vista o uso de **fontes primárias de dados**, como por exemplo: a partir de entrevistas com representantes de empresas e/ou análise de documentos internos das mesmas, medições *in loco*, ou também por meio do emprego de modelos matemáticos que correlacionem variáveis de processo (e.g., potência, tempo, velocidade, etc.) para o cálculo do consumo de recursos e/ou da geração de resíduos. No **Apêndice C** são apresentados os questionários utilizados para a obtenção dos dados primários de inventário utilizados nos estudos de caso desta tese;
- Durante o ICV, devem ser coletados também os **fluxos indiretos** associados ao CVP. No caso da etapa de manufatura, a consolidação do inventário ocorrerá somente após a integração dos fluxos indiretos associados ao consumo de eletricidade, água, fluido de corte, ar comprimido, etc., conforme o sistema de produto pré-definido na **Etapa 1**. Normalmente, a fonte de dados para a obtenção dos fluxos indiretos são os bancos de dados e softwares de ACV (rever Quadro 3 da seção 2.4.2).

Assim, a Figura 37 ilustra a relação entre os fluxos diretos e indiretos dos dados de inventário para a etapa de manufatura. O ICV do produto será composto pela soma de todos os fluxos diretos e indiretos de todas as etapas do CVP, sendo que no caso da etapa de manufatura, os dados a serem coletados deverão estar detalhados em nível de operação (processo elementar 1, 2, ..., n), evitando-se a criação de processos *black-box*.

É importante notar que fluxos como eletricidade, água, fluido de corte, ar comprimido, etc., em geral, são enquadrados como **consumíveis** (KELLENS et al., 2012a; KELLENS, 2013), isto é, tratam-se de insumos utilizados na manufatura dos produtos, mas que não integram, necessariamente, a lista de matérias-primas.

Os fluxos indiretos devido ao consumo de matérias-primas também devem ser quantificados durante o ICV, sendo que nesta tese, os fluxos foram calculados conforme as quantidades de resíduos gerados durante o processamento das matérias primas por cada processo elementar de manufatura. Por exemplo, se num processo de usinagem se consome 1 kg de aço (matéria-prima) e a geração de cavaco é de 0,2 kg, então, a contribuição desse processo de usinagem para os fluxos indiretos da cadeia de produção do aço seria de 0,2 kg. Portanto, trata-se de uma abordagem baseada na eficiência de cada processo produtivo.

Figura 37 – Diagrama de fluxo de processo da etapa de manufatura e relação entre os fluxos diretos e indiretos
Fonte: elaborado pelo autor

Etapa 3: Avaliação do Impacto do CVP

Sobre a etapa de AICV, o passo-a-passo para realização das atividades deve estar condizente com o conteúdo já discutido na seção 2.4.3.

Para efeito deste procedimento de *GM*, a AICV utilizará primeiramente a Equação 1:

$$PIA = \sum_k \left(\frac{\sum_s CF_s \times E_s}{R_k} \right) \quad (1)$$

Sendo:

PIA = Potencial de impacto ambiental;

CF_s = Fator de caracterização para o aspecto ambiental inventariado s ;

E_s = Quantidade do aspecto ambiental inventariado s ;

R_k = Fator de normalização para a categoria de impacto k .

Os resultados de ICV da **Etapa 2** são utilizados na Equação 1, pois os valores de E_s são obtidos diretamente a partir do ICV. O fator R_k é obtido mediante a realização da etapa de *normalização*. Ainda que seja um elemento opcional segundo a metodologia de ACV, neste procedimento de *GM* foi proposto o uso da normalização porque assim é possível identificar as categorias de impacto k mais relevantes frente aos fatores de normalização R_k aplicados, embora, fatores de *ponderação* da AICV também possam ser utilizados na equação.

As unidades para as variáveis CF_s e R_k dependem do método de AICV selecionado, conforme, por exemplo, a lista de métodos já apresentada no Quadro 4 da seção 2.4.3. Consequentemente, a unidade do resultado de PIA também dependerá do método de AICV escolhido. Para efeito dos estudos de caso desta tese, foi utilizado o método ILCD/PEF Recommendation, logo, o valor final de PIA foi expresso em pessoa equivalente¹⁶.

Após a aplicação da Equação 1, deve ser utilizada a Equação 2, para assim ser possível identificar o grau de contribuição dos processos elementares da etapa de manufatura referentemente aos impactos do CVP.

$$CR_i = \frac{PIA_i}{PIA_T} \times 100\% \quad (2)$$

Sendo:

CR_i = Contribuição relativa do processo elementar i da etapa de manufatura para os impactos ambientais do CVP;

PIA_i = Potencial de impacto ambiental do processo elementar i da etapa de manufatura. Esta variável é calculada utilizando-se a Equação 1;

PIA_T = Potencial de impacto ambiental total do CVP. Esta variável é calculada utilizando-se a Equação 1.

É importante ressaltar que conforme discussão feita na seção 4.1.1, a grande maioria das proposições teóricas de *GM* analisadas não incluíram a avaliação dos impactos ambientais potenciais. Assim, visando uma maior completeza do estudo de ACV, nesta etapa de aplicação do procedimento recomenda-se a utilização de todas as categorias de impacto do método de AICV previamente selecionado.

¹⁶ Os indicadores foram normalizados em impacto ambiental por pessoa equivalente, referência *European Union* (EU-27) 2010. Isso significa que os impactos ambientais potenciais foram representados pelo equivalente em número pessoas da União Europeia que causariam os mesmos impactos, no ano base de 2010.

Etapa 4: Interpretação

A partir de situações de referência, os processos elementares da etapa de manufatura são classificados quanto ao seu grau de significância em relação aos impactos do CVP, sendo:

- **Situação A:** processos que gerem 5,0% ou mais dos impactos do CVP;
- **Situação B:** processos que influenciem em 5,0% ou mais dos impactos das etapas a montante (extração e beneficiamento de recursos);
- **Situação C:** processos que influenciem de maneira “*muito relevante*” ou “*relevante*” nos impactos das etapas a jusante da manufatura do produto (uso e fim de vida).

A **situação A** pode ser verificada diretamente ao se aplicar a Equação 2 da **Etapa 3**, e a **situação B** pode ocorrer devido aos impactos associados aos fluxos indiretos da manufatura. Os valores de 5,0% de impacto no CVP para as situações A e B tratam-se de valores arbitrários, e que, portanto, podem ser mais ou menos restritivos.

Por último, a **situação C** pode ocorrer devido aos resultados do **Apêndice D**, onde por meio de uma avaliação qualitativa baseada no *Quality Function Deployment* (QFD), é analisada a influência dos processos de manufatura sobre os impactos ambientais das etapas de uso e de pós-uso do produto. O resultado final da análise é uma classificação dos processos de manufatura em: “*muito relevante*”, “*relevante*” e “*pouco relevante*”. Diferentemente das situações A e B que são baseadas em resultados quantitativos, a situação C é qualitativa porque aqui ainda não há informações que permitam avaliar quantitativamente a influência dos processos de manufatura sobre os impactos ambientais a jusante da manufatura.

Portanto, três tipos de processos podem ser observados durante a **pré-avaliação**:

- **Tipo I:** processos que envolvam as situações de referência A, B e C;
- **Tipo II:** processos que envolvam duas das três quaisquer situações de referência; e
- **Tipo III:** processos que envolvam somente uma das três quaisquer situações de referência.

Como discutido na seção 4.1.1, uma das limitações das proposições teóricas avaliadas foi a não existência de um procedimento para a seleção dos processos de manufatura mais relevantes na visão de CVP. Assim, a proposta da classificação dos processos em Tipo I, II, ou III auxilia na superação desta lacuna identificada.

Conforme mostrado na Figura 35, os resultados da **pré-avaliação** são obtidos ao se concluir a **Etapa 4**, que visa: 1) selecionar os processos de manufatura ambientalmente mais relevantes no CVP; e 2) identificar os aspectos e impactos ambientais mais relevantes no CVP. Pela Equação 1 da **Etapa 3**, as principais categorias de impacto ambiental são identificadas, assim como os respectivos aspectos que contribuíram para os impactos

calculados. Já pela classificação de processos em Tipo I, II, e III, são selecionados os processos de manufatura de destaque no CVP.

Para facilitar o processo de organização dos resultados finais da **pré-avaliação**, pode-se empregar a **Matriz de Priorização de Processos** do exemplo do Quadro 14.

Processo elementar da etapa de manufatura	Resultados pela Equação 1		Tipo de processo (I, II ou III)	Ordem de prioridade
	Categorias de impacto ambiental de destaque	Aspectos ambientais de destaque		
Processo 1	Potencial de aquecimento global	- Consumo de energia A - Consumo de energia B	Tipo I	1º
	Potencial de acidificação	- Consumo de energia A - Consumo de energia B		
	Potencial de toxicidade humana	- Emissão ao ar da substância X		
Processo 2	Potencial de depleção de recursos	- Consumo do material X	Tipo II	2º
	Potencial de toxicidade humana	- Consumo do material Y - Emissão a água da substância Y		
Processo ...	...	...	...	...
Processo n	Potencial de eutrofização	- Emissão a água da substância X	-	descartado

Quadro 14 – Exemplo de uso da matriz priorização de processos para a *pré-avaliação*

Fonte: elaborado pelo autor

A coluna “*ordem de prioridades*” deve ser utilizada para ordenar os processos elementares mais relevantes da etapa de manufatura, sendo que para isso, primeiro se leva em conta os resultados obtidos na coluna “*tipo de processo*”, e depois os resultados obtidos pela Equação 1. Para a construção da matriz do Quadro 14 foi utilizado o modelo de Folha de Verificação proposto por Silva et al. (2013a) e Tague (2004).

Os processos prioritários devem ser os classificados como **Tipo I**, afinal, esses apresentam potencial de influenciar nos impactos de todas as etapas do CVP. Por fim, processos elementares não enquadrados como Tipo I, II ou III podem ser descartados.

Um resumo de todas as atividades e ferramentas discutidas ao longo da macroetapa de **pré-avaliação** é apresentado na Figura 38.

Diferentemente da **pré-avaliação** onde geralmente se utilizam dados históricos médios para a consolidação do ICV, durante a macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**, os dados de entrada/saída a serem coletados são específicos para o(s) processo(s) elementar(es) selecionado(s) na **Etapa 4**. Para isso, é necessário monitorar o processo de

manufatura de interesse, sendo que a amostragem dos dados de entrada/saída deve ocorrer conforme o delineamento experimental estabelecido na **Etapa 5**.

Figura 38 – Detalhamento das atividades da macroetapa de *pré-avaliação* no procedimento de *GM* desenvolvido
Fonte: elaborado pelo autor

Etapa 5: Delineamento experimental

Esta é a primeira etapa da macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**. O termo delineamento experimental foi utilizado pelo fato de serem definidos aqui os limites de fronteira de cada processo elementar prioritário da **Etapa 4**, os modos de operação e as subunidades existentes, os parâmetros de processo, e os RTQP.

Redefinição dos limites de fronteira de cada processo elementar

Cada processo elementar deve ser redefinido visando sua reestruturação em termos dos limites de sua fronteira. Primeiramente, deve-se analisar se os processos elementares selecionados na **Etapa 4** estão agregados em subsistemas ou não. Caso estejam agregados, cada subsistema deverá ser estratificado em nível de operação.

A atividade de estratificar os subsistemas em processos elementares se baseia num julgamento, afinal, como estavam agregados, não é possível saber com exatidão qual foi a contribuição real de cada um dos processos agregados para os impactos do CVP. Sugere-se que este julgamento seja feito por meio de entrevistas com especialistas, conforme abordado na **parte 2** do questionário do **Apêndice E**.

Feito isso, cada processo elementar deve ser correlacionado aos aspectos ambientais mais relevantes do CVP. Esses aspectos são resultados da **Etapa 4**. Além disso, cada processo deve também ser examinado em termos de suas subunidades. A seleção das subunidades depende do tipo de processo de manufatura, da disponibilidade de dados, e da relevância em se detalhar o processo elementar em nível de suas subunidades. A Figura 39, exemplifica um processo elementar de manufatura redefinido em termos de seus limites de fronteira.

Figura 39 – Exemplo de limites de fronteira de um processo elementar
 Fonte: adaptado de Kellens et al. (2012a) e Kellens (2013)

Na Figura 39 os aspectos ambientais em destaque (i.e., *consumo de energia A*, *consumo do material X*, e *emissão ao ar da substância X*) exemplificam aqueles aspectos exaltados no Quadro 14 da **Etapa 4**. Também são identificadas as subunidades do processo elementar (subunidade 1, 2, ..., n), o material para processamento (produtos intermediários – peças, componentes), coprodutos, e o material processado (i.e., novo produto intermediário ou produto acabado). Por último, há as entradas (recursos materiais e energéticos) e as saídas ao meio ambiente (emissões ao ar, água e solo).

Para as entradas destacadas na Figura 39 (*consumo de energia A*, e *consumo do material X*) é importante definir seus fluxos indiretos associados, caso isso ainda não tenha sido feito durante a **Etapa 1** em virtude, por exemplo, do grande número e da complexidade dos processos elementares existentes no sistema de produto.

Nessa linha, outra decisão envolve a inclusão dos fluxos indiretos devido aos processos de construção do maquinário industrial utilizado no processo de manufatura em análise. Afinal, como discutido na seção 4.1.1, os impactos ambientais devido à construção das máquinas e dos equipamentos industriais podem ser tão significativos quanto os impactos relacionados às atividades de manufatura. Desse modo, se sugere a utilização do **Diagrama de Relações** da Figura 40 como ferramenta de auxílio durante o processo de mapeamento dos fluxos indiretos devido à construção do maquinário industrial. O diagrama a seguir apresentado também é conhecido na literatura pelo termo *Teardown Analysis*.

Figura 40 – Exemplo de diagrama de relações para o mapeamento dos materiais e componentes utilizados na construção de maquinário industrial

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 40, para o processo elementar de interesse, primeiramente são listadas todas suas subunidades. Em seguida, cada subunidade é estratificada no intuito de identificar todos os seus componentes e materiais que a integram. Feito isso, deve ser realizada uma busca desses materiais e componentes junto aos bancos de dados e softwares de ACV disponíveis, com foco principalmente naqueles fluxos com representatividade mássica maior (*Material 1.2.1, Componente 2.1, Material n*). Para os fluxos indiretos mapeados, então na **Etapa 6** deste procedimento será apresentada uma abordagem para a quantificação e inclusão desses fluxos de infraestrutura junto ao ICV do processo elementar em estudo.

Definição dos modos de operação

Aqui o objetivo é estabelecer os modos de operação de cada processo elementar. No Quadro 15, há uma lista com os principais modos de operação existentes segundo Kellens et al. (2012a), Kellens (2013) e Overcash, Twomey e Isaacs (2009).

Sigla	Modo de operação	Descrição
A	Modo de iniciação	- Envolve o tempo de preparo, ajuste e calibração da máquina-ferramenta e subunidades a partir de quando a máquina é ligada.
B	Modo de produção plena	- Contabiliza o tempo para o processamento do produto/material, em situação de máxima capacidade de produção.
C	Modo parcial de produção	- Análogo ao modo de produção B, todavia, o processo não está em sua máxima capacidade de produção, mas sim, em algum nível intermediário durante o processamento do produto/material.
D	Modo de espera	- Também conhecido por <i>stand-by</i> , aqui é contabilizado o tempo para novas ajustagens, <i>setup</i> e aferição de subunidades antes do processamento do produto/material.
E	Modo de desligamento	- Diferentemente do modo A, aqui é medido o tempo necessário para que ocorra o desligamento de todas as subunidades do processo após o término das atividades de manufatura.
F	Outros	- Definição de outros modos de operação julgados convenientes (e.g., modo de manutenção da máquina).

Quadro 15 – Modos de operação existentes em processos de manufatura

Fonte: Adaptado de Kellens et al. (2012a), e Overcash, Twomey e Isaacs (2009)

Os modos de operação B e C são classificados como **modos produtivos** (i.e., situações em que a máquina está ativa, realizando operações de manufatura), enquanto que os modos A, D e E são os **modos não produtivos**. Esses modos de operação podem também ser relacionados as subunidades e aos aspectos ambientais em estudo, conforme o Quadro 16.

No Quadro 16, é apresentado um exemplo de **Matriz de Relacionamentos** extraída a partir de Kellens (2013), a qual deve ser preenchida para efeito de organização dos modos de

operação junto aos aspectos ambientais e as subunidades do processo elementar. No exemplo, sabe-se que no processo ocorre o *consumo do material X* nas *subunidades 1, 2 e 3*, e durante os modos de operação A, B e C. Além disso, os principais aspectos ambientais (definidos durante a **pré-avaliação**) estão destacados em negrito, para efeito de distinção dos demais.

Aspectos ambientais	Subunidade	Modos de operação				
		A	B	C	D	...
Consumo de energia A	Subunidade 1, 2, 3	X	X			
Consumo de energia B	Subunidade 1 e 2	X	X	X	X	
...	Subunidade					
Consumo do material X	Subunidade 1, 2, 3	X	X	X		
Consumo do material Y	Subunidade 1, 2, 3	X			X	
...	Subunidade ...					
Emissão de X ao ar	Subunidade 1, 2, 3	X	X	X	X	
....	Subunidade ...	X				
Emissão de Y a água	Subunidade 1, 2			X		
...	Subunidade ...					
Emissão de Z ao solo	Subunidade 1		X			

Quadro 16 – Exemplo de matriz de relacionamentos para a correlação entre aspectos ambientais, subunidades e modos de operação

Fonte: adaptado de Kellens (2013)

Definição dos parâmetros de processo e dos requisitos técnicos de qualidade do produto

Nesta subetapa são definidos os parâmetros de processo e os RTQP a serem estudados para cada processo elementar prioritário segundo os resultados da **pré-avaliação**.

Se entende por parâmetros ou variáveis de processo, as condições internas ou externas que afetam o desempenho de um processo de manufatura, tais como pressão, vazão, nível, temperatura, pH, velocidade, posição, etc. Os parâmetros devem ser passíveis de medição, registro e controle por meio de instrumentação (e.g., uso de sensores, controladores).

Esses parâmetros são utilizados para fornecer informações sobre a manufatura, e para garantir a qualidade desejada ao produto em fabricação. Como discutido na seção 2.3, esses parâmetros podem afetar os impactos ambientais a montante da manufatura. A lista de parâmetros depende do tipo de processo de manufatura estudado, por exemplo, enquanto que num processo de usinagem, força e velocidade de corte são variáveis importantes, já num processo de prensagem à quente as variáveis pressão e temperatura são essenciais.

Sobre os requisitos técnicos de qualidade do produto (RTQP), tratam-se de propriedades ou de comportamentos adquiridos pelo produto durante e/ou após o processo de manufatura. Os RTQP são características intrínsecas dos produtos que se perlongam durante toda sua vida útil, e que portanto, podem ter efeito sobre os impactos ambientais subsequentes à manufatura

(uso, pós-uso). São exemplos de RTQP: propriedades mecânicas (flexão, tração, compressão, etc.), propriedades físicas (densidade, porosidade, rugosidade, etc.), propriedades químicas (calor de combustão, inflamabilidade, reatividade, etc.), e propriedades organolépticas (cor, brilho, odor, textura, etc.). A definição desses requisitos depende do tipo de produto. Por exemplo, na produção de uma válvula para uso em motores à combustão um requisito importante é a rugosidade superficial da peça, enquanto que na manufatura de painéis para uso em móveis de madeira, um requisito essencial seria a densidade do painel.

Para a definição dos parâmetros de processo e dos RTQP, pode-se utilizar o Quadro 17. Para auxiliar no seu preenchimento, na **parte 2 do Apêndice E** é apresentado um questionário que foi utilizado durante os estudos de caso desta tese.

O Quadro 17 deve ser preenchido para o processo selecionado na **pré-avaliação**. Seu preenchimento começa pelo cabeçalho, onde se devem colocar informações gerais como, nome do responsável por fornecer as informações, a identificação do processo elementar (tipo de operação realizada, marca e tipo de máquina utilizada), e fluxo de referência do processo, etc. Feito isso, são especificados os parâmetros relevantes do processo elementar, a unidade e o nível/faixa de variação para cada parâmetro listado. Por último, na coluna “*comentários*” podem ser adicionadas informações sobre a forma de medição, registro e controle de cada parâmetro de processo. Para exemplificação, foram adicionados os parâmetros fictícios *parâmetro 1* e *parâmetro 2*, assim como suas unidades e faixas de variação.

Entrevistado(s):		Data do preenchimento:	
Identificação do processo elementar:		Material processado:	
Local de origem dos dados:		Fluxo de referência (FR) do processo elementar:	

Parâmetros de processo	Unidade	Nível		Comentários
		Valor mínimo	Valor máximo	
<i>Parâmetro 1</i>	<i>Uni 1</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	
<i>Parâmetro 2</i>	<i>Uni 2</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	

Requisitos técnicos de qualidade do produto (RTQP)	Unidade	Valor mínimo	Valor máximo	Comentários
<i>Requisito 1</i>	<i>Uni 1</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	
<i>Requisito 2</i>	<i>Uni 2</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	
<i>Requisito 3</i>	<i>Uni 3</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	

Quadro 17 – Exemplo de folha para a coleta de dados sobre os parâmetros de processo e os RTQP

Fonte: elaborado pelo autor

Também devem ser listados no Quadro 17 os RTQP. Cada requisito (*requisito 1, requisito 2, requisito 3*) é especificado em termos de sua unidade e nível, conforme os valores teóricos/esperados dos requisitos relevantes afetados pelo processo elementar em estudo.

Feito isso, devem ser definidas condições experimentais (CEx) ou tratamentos, com base na combinação entre os fatores de entrada (parâmetros de processo) e os níveis de cada fator. Assim, o Quadro 18 segue como exemplo para a obtenção e organização das CEx, a partir do esquema fatorial entre o total de fatores combinados em cada experimento.

Fatores de entrada		Níveis experimentais		
Parâmetros (Definidos no Quadro 17)	Unidade	Valor mínimo	...	Valor máximo
<i>Parâmetro 1</i>	<i>Uni 1</i>	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>5</i>
<i>Parâmetro 2</i>	<i>Uni 2</i>	<i>10</i>	<i>-</i>	<i>15</i>

CEx	Composição entre os fatores
<i>1</i>	<i>Parâmetro1 = 1; Parâmetro2 = 10</i>
<i>2</i>	<i>Parâmetro1 = 1; Parâmetro2 = 15</i>
<i>3</i>	<i>Parâmetro1 = 3; Parâmetro2 = 10</i>
<i>4</i>	<i>Parâmetro1 = 3; Parâmetro2 = 15</i>
<i>5</i>	<i>Parâmetro1 = 5; Parâmetro2 = 10</i>
<i>6</i>	<i>Parâmetro1 = 5; Parâmetro2 = 15</i>

Quadro 18 – Exemplo de folha para a definição e organização das CEx

Fonte: elaborado pelo autor

Como será visto na **Etapla 8**, a principal vantagem na utilização de um planejamento fatorial de experimentos está na possibilidade de permitir o estudo de soluções ótimas a partir da combinação dos parâmetros de interesse. Para cada CEx do Quadro 18, é recomendado que haja repetições dos testes. Afinal, na **Etapla 8**, serão realizadas análises estatísticas, e a confiabilidade dessas análises dependerá da qualidade da amostra estudada.

O resultado final do delineamento experimental é apresentado no Quadro 19. A **Matriz de Monitoramento Ambiental do Processo** apresenta um cabeçalho, e está organizada em função das CEx do Quadro 18. Para cada CEx haverá um tempo de experimento associado, o qual representará o tempo de manufatura para cada modo de operação e subunidade.

Ao término de cada experimento são determinados os valores dos requisitos técnicos de qualidade do produto/material processado, os quais deverão estar em consonância com suas respectivas faixas de variação previstas inicialmente no Quadro 17. Os RTQP como propriedades químicas, físicas, e mecânicas, em geral, são determinados em ensaios de laboratório, e posteriormente comparados a algum padrão (normas, requisitos de clientes, referências da literatura, entre outros).

Identificação do processo elementar:		Material processado:		Local de origem dos dados:	
Data do experimento:		Fluxo de referência do processo elementar:			

Condições experimentais (CEx)	Tempo de experimento [Unidade]	Modos de operação	Subprocessos	Aspectos ambientais a serem monitorados na manufatura				Requisitos técnicos de qualidade do produto		
				Consumo de energia A [Unidade]	Consumo do material X [Unidade]	Emissões de X ao ar [Unidade]	...	Requisito 1	...	Requisito n
1		A	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
		B	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
		C	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
		D	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
...	A	Subunidade 1								
		Subunidade 2								
		...								
		Subunidade n								
	B	Subunidade 1								
		Subunidade 2								

		C	...							
			Subunidade n							
			Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
		D	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
n		A	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
		B	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
		C	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							
		D	Subunidade 1							
			Subunidade 2							
			...							
			Subunidade n							

Quadro 19 – Exemplo de matriz de monitoramento ambiental de processo de manufatura para “n” condições experimentais

Fonte: elaborado pelo autor

Etapa 6: Monitoramento ambiental do processo elementar

Tendo finalizado o delineamento experimental, o próximo passo envolve a etapa de monitoramento ambiental do processo elementar, devendo ser realizada de tal modo que:

- Possibilite o monitoramento dos processos elementares selecionados na **Etapa 4**, tendo em vista os diferentes modos de operação e as subunidades identificadas na **Etapa 5**;
- Possibilite o monitoramento dos processos elementares selecionados na **Etapa 4**, tendo em vista os parâmetros de processo e os RTQP definidos na **Etapa 5**; e
- Permita o monitoramento dos aspectos ambientais destacados na **Etapa 5**.

Para o processo de interesse, deve-se utilizar a **Matriz de Monitoramento Ambiental do Processo** do Quadro 19, sendo que para a quantificação do consumo de recursos e emissões geradas na manufatura podem ser utilizadas as equações a seguir detalhadas.

Consumo de recursos energéticos, em MJ:

$$C_{T,E} = \sum_i^n \sum_j^m C_{E(i,j)} \quad (3a)$$

Sendo:

$C_{T,E}$ = Consumo total da energia monitorada no processo elementar (J);

$C_{E(i,j)}$ = Consumo de energia monitorada em função do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j do processo elementar (J);

n = Modos de operação considerados, entre A e F;

m = Número de subunidades existentes no processo elementar.

E Equação 3a está em seu formato mais genérico, sendo que o termo $C_{E(i,j)}$ pode representar o consumo de qualquer tipo de recurso energético: eletricidade, vapor superaquecido, biomassa, óleo fóssil, etc. Contudo, em se tratando do consumo de eletricidade, a utilização da Equação 3b se mostra mais indicada, segundo os autores Eastwood e Haapala (2015), Filleti et al. (2014), Kellens et al. (2012b), e Kellens (2013).

$$C_{T,E} = \sum_i^n \left[\sum_j^m (P_{i,j} \times T_{i,j}) \right] \quad (3b)$$

$P_{i,j}$ = Consumo de potência monitorada em função do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j do processo elementar (W);

$T_{i,j}$ = Tempo de duração do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j (s).

O termo $T_{i,j}$ pode ser determinado de maneira distinta em função do modo de operação vigente. Por exemplo, os tempos de duração dos modos A e E, em geral, devem ser divididos pela quantidade de produtos produzidos num turno de trabalho (e.g., 8 horas, 12, horas), pois, respectivamente, os modos de iniciação e de desligamento ocorrem apenas uma vez por turno. Já os modos B e C são contabilizados por unidade de produto manufaturado, enquanto que o modo de operação D ocorre antes e depois do processamento de cada unidade de produto.

É importante explicar que aplicando a Equação 3a/3b, ou qualquer outra das equações a seguir descritas, todos os resultados deverão posteriormente ser referenciados para o fluxo de referência FR do estudo, definido ainda durante a **pré-avaliação**. Assim, os resultados da etapa de monitoramento refletirão a performance do processo sob a visão de todo o CVP.

Consumo de recursos materiais, em kg:

$$C_{T,M} = \sum_i^n \sum_j^m C_{M(i,j)} \quad (4a)$$

Sendo:

$C_{T,M}$ = Consumo total do material monitorado no processo elementar (kg);

$C_{M(i,j)}$ = Consumo do material monitorado em função do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j do processo elementar (kg);

O consumo de materiais na Equação 4a está em seu formato mais genérico, sendo que o termo $C_{M(i,j)}$ pode representar o consumo de qualquer tipo de recurso material: água, ar comprimido, matérias primas, etc. Contudo, em se tratando do consumo de água e/ou insumos a base d'água, Eastwood e Haapala (2015) defendem a utilização da Equação 4b:

$$C_{T,M} = \sum_i^n \left[\sum_j^m (r_{i,j} \times T_{i,j}) \right] \quad (4b)$$

$r_{i,j}$ = vazão mássica do fluido monitorado em função do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j do processo elementar (kg/s).

Emissões ao ar, em kg:

$$E_{T, ar} = \sum_i^n \sum_j^m E_{ar(i,j)} \quad (5)$$

Sendo:

$E_{T, ar}$ = Emissão total ao ar da substância monitorada no processo elementar (kg);

$E_{ar(i,j)}$ = Emissão ao ar da substância monitorada em função do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j do processo elementar (kg).

Emissões a água, em kg:

$$E_{T, agua} = \sum_i^n \sum_j^m E_{agua(i,j)} \quad (6a)$$

Sendo:

$E_{T, agua}$ = Emissão total a água da substância monitorada no processo elementar (kg);

$E_{agua(i,j)}$ = Emissão a água da substância monitorada em função do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j do processo elementar (kg).

Analogamente a Equação 4b, a geração de efluentes líquidos também é comumente calculada em função da vazão mássica $r_{i,j}$, segundo a Equação 6b:

$$E_{T, agua} = \sum_i^n \left[\sum_j^m (r_{i,j} \times T_{i,j}) \right] \quad (6b)$$

Emissões ao solo, em kg:

$$E_{T, solo} = \sum_i^n \sum_j^m E_{solo(i,j)} \quad (7)$$

Sendo:

$E_{T, solo}$ = Emissão total ao solo da substância monitorada no processo elementar (kg);

$E_{solo(i,j)}$ = Emissão ao solo da substância monitorada em função do modo de operação i (entre A e F) na subunidade j do processo elementar (kg).

Por fim, para efeito de verificação do balanço mássico do processo estudado, a Equação 8 pode ser utilizada. Em relação ao balanço energético, podem-se aplicar princípios da Termodinâmica para analisar as perdas de calor e a energia útil convertida em trabalho no sistema. Também, quando houver reação química no processo estudado, o balanço mássico e/ou energético deve seguir a estequiometria da reação.

$$C_{T,M} = E_{T,ar} + E_{T,agua} + E_{T,solo} \quad (8)$$

É importante notar que a exemplo das equações 3b, 4b, e 6b, dependendo do tipo de processo, modelos matemáticos podem ser utilizados para o cálculo do consumo de recursos e emissões. Por exemplo, para o consumo de eletricidade na retificação de metais, tomando-se a Equação 3a, a variável $C_{E(i,j)}$ segundo Linke e Overcash (2012) poderia ser calculada em função da força de corte tangencial específica F'_t , a velocidade do rebolo de corte (V_s), e a taxa de remoção de material específica Q'_w . Assim, o cálculo do $C_{E(i,j)}$ fica:

$$C_{E(i,j)} = \frac{F'_t \times V_s}{Q'_w} \quad (9)$$

Porém, no estudo de Linke e Overcash (2012) seria ainda necessário incluir os modos de operação i existentes (tipo A, B, C...), e também calcular o consumo de energia das subunidades j da máquina (fornecimento de fluido de corte, sistema de dressagem, etc.). Somente assim que o $C_{T,E}$ da Equação 3a poderia ser calculado de forma completa.

Pelas Equações de 3a a 7 são calculados os fluxos diretos de entrada e de saída do processo, sendo necessário ainda contabilizar os respectivos fluxos indiretos. Para os fluxos indiretos de infraestrutura, podem ser empregadas as Equações de 10 e 11.

$$f = \left(\frac{T}{T_0} \times 250V_i \right)^{-1} \quad (10)$$

Considerando:

$$T_0 = \frac{\left(\sum_i^n \sum_j^m T_{i,j} \right)}{3600} \quad (11)$$

Sendo:

f = Quantidade de bens de capital/infraestrutura (máquinas e equipamentos) necessários para a produção de uma unidade de produto. Este fator é utilizado para o ajuste dos fluxos de inventário de bens de capital para uma unidade de produto produzido;

T = Tempo total de funcionamento da máquina durante um dia de trabalho (h/dia);

T_0 = Tempo total de funcionamento da máquina para produzir uma unidade de produto (h/unidade de produto);

V_i = Vida útil inicial/projetada para a máquina (anos);

As Equações de 10 e 11 foram propostas a partir dos estudos de Dahmus e Gutowski (2004), Diaz et al. (2010), Santos et al. (2011), e Zendoia et al. (2014). Porém, é importante ressaltar que esses autores não propuseram essas equações, mas sim, explicaram em seus trabalhos que os impactos devido à construção das máquinas industriais devem ser rateados pela quantidade de produtos produzidos ao longo de toda a vida útil das máquinas.

Para o cálculo de f primeiro deve-se conhecer V_i e T_0 . A variável V_i representa a vida útil da máquina/equipamento. Já T_0 é o somatório de todos os tempos de operação da máquina para os diversos modos de produção (de i a n) e subunidades (de j a m). A variável T é determinada levantando-se em conta o tempo total de funcionamento da máquina para um dia completo de trabalho (e.g., 8 h/dia, 12 h/dia). Por fim, a divisão de T por T_0 resulta na quantidade de produtos manufaturados por dia, e a sua multiplicação por $250V_i$ representa uma extrapolação da quantidade de produtos que a máquina é capaz de produzir ao longo de toda sua vida útil, assumindo a referência de 250 dias úteis por ano.

Assim, quanto menor V_i maior será o valor calculado para f , o que faz sentido, pois quanto mais curta a vida útil de uma máquina/equipamento, menor será a quantidade de produtos que a mesma poderá produzir, e assim os impactos devido à construção das máquinas/equipamentos industriais deverão ser também maiores. O inverso dessa lógica ocorrerá quanto maior for a relação T/T_0 , visto que a quantidade de produtos que a máquina poderá produzir será maior, e assim, os impactos ambientais tenderão ser menores.

Os dados de inventário da cadeia de produção das máquinas e equipamentos industriais definidos durante a **Etapa 5** (rever Figura 40) devem ser multiplicados pelo valor calculado de f . Por exemplo, se uma máquina industrial é composta por 250,0 kg de ferro fundido, e o seu valor de f foi de 1,4E-06, então o valor ajustado deste fluxo indireto será de 3,5E-04 kg de ferro fundido para cada unidade de produto manufaturado.

Finalmente, após a quantificação dos fluxos diretos e indiretos a montante da etapa de manufatura, como última atividade devem ser analisados os resultados dos RTQP através do emprego do modelo de **Matriz de Relacionamentos** do Quadro 20.

Entrevistado(s):		Data do preenchimento:		Fluxo de referência (FR):	
Local de origem dos dados:		Produto estudado:			

Condições Experimentais (CE _x)	Requisitos técnicos de qualidade do produto (obtidos pelo Quadro 19)			Correlação dos requisitos técnicos de qualidade do produto com as etapas do CVP a jusante da manufatura		
				Etapa afetada	Aspectos ambientais afetados	Quantificação dos aspectos afetados
1	Requisito 1	[Unidade]	[Valor]	[uso / fim de vida]	[consumo / emissões]	[X kg de emissões...]
	...					
	Requisito n					
2	Requisito 1					
	...					
	Requisito n					
...	Requisito 1					
	...					
	Requisito n					
n	Requisito 1					
	...					
	Requisito n					

Quadro 20 – Exemplo de matriz de relacionamentos para a correlação entre RTQP e as etapas do CVP a jusante da manufatura para “n” condições experimentais

Fonte: elaborado pelo autor

Deve-se analisar para cada CEx como que os resultados dos RTQP podem influenciar os aspectos ambientais das etapas de CVP a jusante da manufatura (i.e., uso e fim de vida). Assim, no Quadro 20, primeiramente há um cabeçalho para identificação da fonte dos dados a serem coletados, o produto estudado e o seu FR. Feito isso, para cada CEx colocam-se os resultados dos RTQP obtidos de acordo com a folha de coleta de dados do Quadro 19. Posteriormente, faz-se a correlação de cada requisito com as etapas do CVP subsequentes à manufatura. Na coluna “*etapa afetada*”, é especificada a etapa afetada pelo requisito (e.g., uso, fim de vida); na coluna “*aspectos ambientais afetados*” são levantados os aspectos ambientais influenciados por cada requisito de qualidade; e por fim, para cada aspecto ambiental identificado faz-se sua quantificação na coluna “*quantificação dos aspectos afetados*”. O processo de preenchimento desse quadro pode ser realizado, por exemplo, conforme descrito no **Apêndice F**, durante os estudos de caso desta tese.

Etapa 7: AICV do processo elementar

Esta etapa é análoga a AICV realizada durante a **pré-avaliação**. Portanto, as atividades para condução desta etapa são as mesmas já discutidas na **Etapa 3**.

Contudo, ao invés de serem avaliados os impactos potenciais do CVP, aqui serão avaliados os impactos somente dos processos elementares previamente selecionados, e para os aspectos ambientais monitorados na **Etapa 6**. Portanto, trata-se de uma avaliação com foco sobre o processo produtivo e sua influência no CVP.

Algumas características importantes para a condução deste AICV são:

- Assumir o mesmo método de AICV utilizado na **Etapa 3**. Esta decisão é importante, pois torna o processo de aplicação deste procedimento de *GM* mais simples;
- Para cada processo elementar, avaliar somente os impactos para as categorias já previamente destacadas na **Etapa 4**. A exceção neste caso ocorre quando na **Etapa 5** durante a redefinição das fronteiras de cada processo elementar forem incluídos novos fluxos diretos/indiretos, pois desse modo esses fluxos adicionais gerarão impactos potenciais desconhecidos para todas as categorias de impacto;
- Na **Etapa 3**, pela Equação 1 foi realizado o cálculo dos impactos potenciais incluindo o elemento de **normalização**. Já nesta **Etapa 7**, a normalização foi desconsiderada, porque as categorias de impacto de maior interesse para cada processo elementar já são conhecidas;
- Para efeito de organização, a folha de coleta de dados apresentada no Quadro 19 da **Etapa 5**, também poderá ser utilizada nesta etapa de avaliação de impactos. Todavia, as informações nas colunas referentes aos aspectos ambientais, deverão ser substituídas pelas categorias de impacto selecionadas e seus respectivos impactos calculados;

- Sobre os impactos das etapas de uso e de fim de vida do produto, a Equação 1 também deve ser utilizada, sem considerar o elemento de normalização, e para as mesmas categorias de impacto de destaque na **Etapa 4**. Para isso, serão consideradas apenas as modificações de ICV destacadas no Quadro 20 por CEx.

Tendo concluída a mensuração dos impactos potenciais do processo frente ao CVP, os resultados por CEx são analisados estatisticamente durante a **Etapa 8**.

Etapa 8: Análise de contribuição

Na **Etapa 8** é investigada a influência dos tratamentos delineados na **Etapa 5** sobre os impactos calculados na **Etapa 7**, visando identificar os tratamentos que permitam gerar os menores valores de impacto para o CVP.

Da teoria de planejamento de experimentos (*Design of Experiments* – DOE), diversas abordagens e métodos podem ser utilizados para a análise estatística dos resultados da **Etapa 7**, como o Análise de Variância (*Analysis of Variance* – ANOVA), Método Taguchi, Metodologia de Superfície de Resposta, Teste t de Student, etc. (MONTGOMERY, 2005). Contudo, Chompu-inwai et al. (2015) e Silva et al. (2015a) mostraram que a abordagem clássica de Fisher para a realização de Testes de Hipóteses juntamente com os métodos ANOVA e o Teste de Tukey podem ser mais vantajosos em estudos de *GM* por serem menos complexos, e por isso, foram adotados nesta **Etapa 8**.

ANOVA e validação do modelo

Em estudos de Engenharia, a ANOVA, em geral, é empregada ao nível de 5,0% de significância, tendo como hipótese nula (H_0) a equivalência das médias dos tratamentos por resposta e a não equivalência como hipótese alternativa (H_1) (MONTGOMERY, 2005). Dessa forma, P-valor do teste estatístico inferior a 5,0% (0,05) implica em rejeitar H_0 .

Para a validação da ANOVA devem ser utilizados testes de **análise de resíduos estatísticos**¹⁷: Anderson-Darling para o teste de normalidade dos resíduos da ANOVA por resposta, ao nível de 5,0% de significância; Bartlett para averiguar a homogeneidade das variâncias dos resíduos da ANOVA entre os tratamentos, ao nível de 5,0% de significância; e análise de independência dos resíduos em relação à ordem de observação dos tratamentos, para averiguar se os erros são não correlacionados. Pela formulação dos referidos testes de

¹⁷ Resíduo estatístico se remete ao erro observado num mesmo tratamento. Essa variação deve ser ao acaso, podendo ocorrer devido à variabilidade do material utilizado nos experimentos e/ou pelo modo como os experimentos foram executados (MONTGOMERY, 2005).

validação da ANOVA, P-valor superior a 5,0% implica que as distribuições dos resíduos por resposta são normais e que as variâncias dos resíduos entre os tratamentos são equivalentes.

A Tabela 4 mostra como podem ser apresentados os resultados da ANOVA por resposta (*categoria de impacto 1, 2*), assumindo os parâmetros fictícios *F1* e *F2*.

Tabela 4 – Exemplo de aplicação da ANOVA

Fatores e interações	ANOVA [P-valor]	
	Categoria de impacto 1	Categoria de impacto 2
<i>F1</i>	0,2000	0,501
<i>F2</i>	<u>0,001</u>	<u>0,003</u>
<i>F1 x F2</i>	0,080	0,100

Fonte: elaborado pelo autor

Acusada significância dos fatores individuais e/ou de suas interações pela ANOVA (i.e., rejeitar H_0), na sequência são utilizados, respectivamente, o teste de comparações múltiplas de Tukey como forma de eleger a hierarquia dos níveis de cada fator investigado, e gráficos de interação entre fatores para a interpretação dos efeitos de interação da ANOVA. No exemplo da Tabela 4, somente o fator *F2* apresentou p-valores significativos.

Assim, a Tabela 5 mostra como podem ser apresentados os resultados do teste de Tukey, sendo que $\bar{x}$ representa o valor médio dos impactos ambientais calculados por categoria de impacto e para cada nível do fator de destaque (*F2 – nível 1 e nível 2*). O termo “Grupo” é utilizado para enfatizar os níveis estatisticamente equivalentes ou não por nível da variável-resposta, sendo “A” o nível do fator de maior média, “B” o nível do fator com a segunda maior média, etc., e letras iguais implicam em tratamentos com $\bar{x}$ equivalentes.

No exemplo da Tabela 5, para a *categoria de impacto 1*, o *nível 2* do fator *F2* foi aquele que apresentou os menores impactos potenciais ao nível de 5,0% de significância, enquanto que para a *categoria 2*, o destaque ocorreu para *nível 1*.

Tabela 5 – Exemplo de aplicação do teste de Tukey

Categorias de impacto ambiental	Estatística	Níveis do fator <i>F2</i>	
		Nível 1	Nível 2
<i>Categoria de impacto 1</i>	$\bar{x}$	20	17
	Grupo	A	B
<i>Categoria de impacto 2</i>	$\bar{x}$	3050	3100
	Grupo	B	A

Fonte: elaborado pelo autor

Seleção da melhor condição experimental

Após a conclusão do teste de Tukey o próximo passo é selecionar a condição experimental de manufatura que gere os menores valores de impacto potencial para o CVP. Feito isso, também é importante verificar se a condição escolhida atende a todos os RTQP estabelecidos na **Etapa 5**. Afinal, caso a melhor condição selecionada não seja capaz de garantir uma manufatura de produtos com qualidade em todos os requisitos técnicos necessários, deve-se selecionar a próxima condição que gere simultaneamente: **o menor impacto potencial e que atenda todos os RTQP**. Desse modo, a **Matriz de Priorização** do Quadro 21 exibe um exemplo para a seleção do melhor tratamento levando-se em conta os resultados do teste de Tukey. Na coluna “A condição experimental atende aos requisitos?”, para responder “sim” ou “não” é necessário antes ter sido averiguado se todos os RTQP por tratamento (*requisitos 1, 2, 3*) alcançaram os valores-meta esperados (valores extraídos a partir de normas técnicas, padrões e/ou de requisitos de clientes).

Categorias de impacto	Fatores	Melhores condições experimentais (obtidas com base na Tabela 5)	A condição experimental atende aos requisitos?		Melhor condição
Categoria de impacto 1	F1	-	Requisito 1	Sim	Nível 2
	F2	Nível 2	Requisito 2	Sim	
			Requisito 3	Sim	
Categoria de impacto 2	F1	-	Requisito 1	Não	Nível 2
	F2	Nível 1	Requisito 2	Sim	
			Requisito 3	Sim	

Quadro 21 – Exemplo de matriz de priorização para a seleção da melhor condição experimental na macroetapa de avaliação e monitoramento

Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados dos impactos potenciais obtidos na **Etapa 7** para a melhor CEx selecionada no Quadro 21, podem servir de valores-meta para os indicadores de desempenho ambiental que serão abordados na **Etapa 9**. Assim, esses resultados podem ser utilizados para se estabelecer limites na geração de impactos potenciais no CVP.

Por fim, um resumo de todas as atividades e ferramentas discutidas ao longo da macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental** é apresentado na Figura 41, o qual também mostra o resultado final a ser obtido ao término de cada etapa do procedimento.

Figura 41 – Detalhamento das atividades da macroetapa de *avaliação e monitoramento ambiental* no procedimento de *GM* desenvolvido

Fonte: elaborado pelo autor

Etapa 9: Análise de hotspots e definição de indicadores ambientais relevantes

Primeiro realiza-se uma análise de *hotspots* para se investigar em detalhes os impactos ambientais relacionados à melhor CEx definida na **Etapa 8**. Depois, é realizada a proposição de indicadores de desempenho ambiental relacionados ao processo de manufatura e ao CVP.

Análise de hotspots

Para o caso do consumo de energia, Duflou et al. (2012) e Vijayaraghavan et al. (2013) comentam que visando a *GM* é necessário conhecer como que o consumo de energia ocorre na indústria em diversos níveis: consumo por linha/setor de produção, por máquina, e por subunidade das máquinas. Assim, é possível saber com maior nível de detalhes onde é necessário melhorar visando uma redução do consumo de energia de maneira eficaz na manufatura. Além disso, é importante citar que entre as proposições teóricas de *GM* investigadas na seção 4.1.1, apenas Shin et al. (2015) realizaram esse tipo de estratificação.

Para a melhor CEx selecionada na **Etapa 8**, deve-se estratificar os seus resultados dos impactos potenciais em diferentes níveis/subsistemas, segundo o esquema da Figura 42. A contribuição da etapa de manufatura para os impactos do CVP pode ser dividida em impactos diretos e indiretos, e segundo os modos de operação e subunidades vigentes.

Figura 42 – Exemplo de diagrama de relações dos impactos potenciais da etapa de manufatura frente ao CVP

Fonte: elaborado pelo autor

O objetivo principal é que os resultados estratificados permitam a geração de ideias para reduzir os *hotspots* ambientais no CVP, com foco principalmente na redução de impactos nos modos de operação não produtivos (A, D, E). Afinal, tratam-se de impactos potenciais gerados quando o processo de manufatura está ocioso.

Todavia, pode ocorrer dos impactos potenciais da etapa de manufatura não serem os mais significativos frente ao CVP, isto é, pode ocorrer dos impactos relacionados às etapas de extração e beneficiamento de recursos, uso e/ou pós-uso do produto serem mais relevantes. Por exemplo, Warsen e Krinke (2012) explicam que para o caso dos automóveis,

muitos vezes os impactos potenciais da fase de uso dos veículos supera os impactos da manufatura. Neste caso, então se deve analisar como que a etapa de manufatura pode influenciar nos impactos à jusante e/ou à montante da manufatura. Para isso, no caso dos impactos à montante, por se tratarem de fluxos indiretos da etapa manufatura (e.g., consumo de eletricidade, lubrificantes, água, ar comprimido, etc.), a estratificação dos impactos proposta na Figura 42 já seria suficiente para a análise dos *hotspots*. Porém, para o caso dos impactos à jusante da manufatura, esta tese sugere a adoção de uma abordagem combinando a **Análise de Sensibilidade** e o uso de **Gráfico de Dispersão**.

Se os impactos à jusante forem significativos no CVP pode-se aplicar um **Gráfico de Dispersão**¹⁸ correlacionando os resultados dos impactos potenciais à jusante junto aos RTQP escolhidos na **Etapa 5**. Quando a correlação existir (ver exemplo da Figura 43) pode-se aplicar uma **Análise de Sensibilidade** para verificar o quão sensível são os resultados dos impactos para as variações realizadas nos requisitos de destaque (*requisito X*).

Figura 43 – Exemplo de uso das ferramentas gráfico de dispersão e análise de sensibilidade
Fonte: elaborado pelo autor

¹⁸ É uma das Sete Ferramentas Básicas da Qualidade utilizada para analisar se há uma correlação/associação entre duas variáveis contínuas x e y (CARPINETTI, 2012; TAGUE, 2004).

É importante mencionar que a Análise de Sensibilidade no contexto da ACV consiste em estimar o quanto que os resultados da AICV são sensíveis as escolhas e mudanças nos dados de escopo do estudo e/ou de ICV (ABNT, 2009a; ISO, 2006a). Há diversos métodos para a Análise de Sensibilidade, sendo a abordagem *one-at-a-time* (OAT) tida como a de mais simples execução, conforme destacado por Groen et al. (2014). Assim, a abordagem OAT foi adotada nesta tese durante os estudos de caso da seção 4.2.

Tendo concluída a análise estratificada dos impactos potenciais do CVP, um resumo dos *hotspots* ambientais pode ser elaborado conforme a **Lista de Hotspots** do Quadro 22.

Categorias de impacto	Detalhamento dos <i>hotspots</i> ambientais		
	Etapa do CVP de destaque	Principais aspectos ambientais	Possível solução para reduzir/eliminar o <i>hotspot</i>
Categoria de impacto 1	Manufatura	Consumo de energia A	- Minimizar o consumo de energia A no modo de operação B das subunidades 1 e 2.
	Pós-uso	Emissão ao ar da substância A	- Pela Análise de Sensibilidade, variando o requisito X de 0,55 a 0,59, os impactos poderão ser até 10,0% superiores. Logo, o requisito X não deve ser maior que 0,55.
	Pós-uso	Consumo da matéria-prima B	- Pela Análise de Sensibilidade, variando o requisito X de 0,55 a 0,59, os impactos poderão ser até 15,0% superiores. Logo, o requisito X não deve ser maior que 0,55.
...	...	...	...

Quadro 22 – Exemplo de lista de *hotspots* ambientais

Fonte: elaborado pelo autor

Indicadores de impacto ambiental no CVP

Nas proposições teóricas de GM foi verificado durante a seção 4.1.1 estudos como os de Joung et al. (2012), que propuseram o uso de indicadores ambientais na manufatura. Contudo, os indicadores propostos pelos autores focaram apenas nos aspectos e não nos impactos potenciais, e, além disso, não estão vinculados ao CVP. Assim, de modo a superar tais lacunas, nesta tese, se sugere a utilização de modelos de regressão.

O uso de modelos de regressão polinomiais quadráticos completos (Equação 12) possibilita a tentativa de se encontrar soluções ótimas para as variáveis de interesse. Para tanto, os modelos de regressão devem ser testados, sendo que a ANOVA pode ser aplicada neste sentido. Da ANOVA dos modelos de regressão é possível concluir se o modelo testado

é significativo o suficiente para prever as variações de cada variável-resposta de interesse. Também é possível indicar os termos mais significativos do modelo de regressão, e estabelecer a qualidade do ajuste a partir dos coeficientes R^2 (MONTGOMERY, 2005).

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot F1 + \alpha_2 \cdot F2 + \alpha_3 \cdot F1 \cdot F2 + \alpha_4 \cdot F1^2 + \alpha_5 \cdot F2^2 \quad (12)$$

Da Equação 12, Y denota a variável dependente (categoria de impacto potencial), $F1$ e $F2$ simbolizam duas variáveis independentes (fatores, parâmetros ou variáveis de processo), e α_i são os coeficientes ajustados do modelo. Assim, conhecendo os valores de $F1$ e $F2$ é possível estimar o valor de Y , e dessa forma, criar um indicador que possa ser utilizado para prever os impactos potenciais naquela melhor CEx encontrada na **Etapa 8**.

A utilização de modelos de regressão para a definição de indicadores de desempenho ambiental se mostra vantajosa, pois tais modelos são desenvolvidos e ajustados estatisticamente com base nos resultados experimentais do monitoramento do processo de fabricação, sendo ainda possível conhecer o nível de confiabilidade R^2 dos modelos.

Etapa 10: Definição do plano de continuidade

O principal objetivo desta última etapa da **pós-avaliação** está centrado em garantir uma continuidade para a aplicação do procedimento de *GM* também em outros processos produtivos não avaliados até então. Para isso, deve ser levado em conta os resultados da **Etapa 4**, sendo priorizados aqueles outros processos tidos como secundários. Assim, esses processos podem servir de referência para a continuidade da *GM* na empresa.

Esta proposta de continuidade das atividades desenvolvidas ao longo das etapas de 1 a 10 é vantajosa, pois conforme discutido na seção 4.1.1, há poucas proposições teóricas de *GM* (DEIF, 2011; JOUNG et al., 2012; OECD DSTI, 2011; SPROEDT et al., 2015) que abordaram a questão da **melhoria contínua** no estudos de *GM*.

Assim, o Quadro 23 pode ser utilizado como modelo para a organização de um **Plano de Continuidade**, sendo que este plano foi proposto com base no 5W1H (*What, Who, When, Where, Why, e How*), ferramenta comumente utilizada na área de Gestão da Qualidade para a organização de cronogramas de trabalho e de planos de ação (CARPINETTI, 2012; SILVA et al., 2013a; TAGUE, 2004).

O plano proposto no Quadro 23 está organizado em duas frentes: 1) referente ao monitoramento do processo de manufatura estudado; 2) referente ao planejamento do próximo processo de manufatura a ser estudado. Na primeira parte, o processo estudado (*processo 1*) é destacado em termos das categorias de impacto ambiental mais relevantes

(categorias 1 e 2), e dos modelos para previsão dos impactos de interesse. Feito isso, deve-se estabelecer uma frequência de acompanhamento/monitoramento do processo assim como os valores-meta de impacto (X e Z). Os valores-meta X e Z representam os valores dos impactos potenciais calculados na **Etapa 7** para a melhor CEx da **Etapa 8**. Na segunda parte do plano, deve ser definido qual será o próximo processo de manufatura a ser estudado (com base na matriz de prioridades da **Etapa 4**), e depois deve ser estabelecido quando o estudo será iniciado, os responsáveis pela sua condução e o prazo para a conclusão das atividades.

1) ATIVIDADES PARA O PROCESSO DE MANUFATURA ESTUDADO				
Processo de manufatura	Categorias de impacto	Indicadores ambientais (obtidos na Etapa 9)	Qual é a frequência com que será realizado o monitoramento do processo?	Meta (obtida na Etapa 9)
<i>Processo 1</i>	<i>Categoria de impacto 1</i>	$Y_1 = 1000 + 5 \cdot F1 + 0,5 \cdot F1 \cdot F2$	<i>Semanal</i>	$Y_1 \leq X$ <i>impactos/semana</i>
	<i>Categoria de impacto 2</i>	$Y_2 = 10 + 2 \cdot F1^2 + 3 \cdot F2^2$	<i>Mensal</i>	$Y_2 \leq Z$ <i>impactos/mês</i>
2) ATIVIDADES PARA O PRÓXIMO PROCESSO DE MANUFATURA A SER ESTUDADO				
Processo de manufatura	Categorias de impacto	Quando será iniciado o estudo?	Quem irá conduzir o estudo?	Prazo para finalização das atividades?
<i>Processo 2</i>	<i>Categoria de impacto 2</i>	<i>16/10/2015</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Engenheiro de processo - Engenheiro ambiental - Especialista em desenvolvimento de produto 	<i>3 meses</i>
	<i>Categoria de impacto 3</i>			

Quadro 23 – Exemplo de plano de continuidade para a macroetapa de *pós-avaliação*

Fonte: elaborado pelo autor

Finalmente, a **pós-avaliação** se encerra com a conclusão do Plano de Continuidade, e um resumo de todas as atividades das Etapas 9 e 10 segue na Figura 44.

Figura 44 – Detalhamento das atividades da macroetapa de *pós-avaliação* no procedimento de GM desenvolvido

Fonte: elaborado pelo autor

4.2. Resultados da aplicação do procedimento de GM

A seguir, são apresentados os resultados do teste prático do procedimento de GM apresentado ao longo da seção 4.1.2. O primeiro estudo de caso a ser discutido na seção 4.2.1 envolveu a indústria madeireira, e o segundo caso da seção 4.2.2 envolveu a indústria automotiva. Esses dois estudos abordados foram conduzidos utilizando a modelagem atribucional e a situação-alvo A da metodologia de ACV, conforme EC/JRC/IES (2010a).

4.2.1. Estudo de caso 1: indústria madeireira – manufatura de painel aglomerado

Resultados da pré-avaliação: Etapa 1

Foi analisada uma indústria produtora de painéis aglomerados no país, localizada no Estado de São Paulo. A empresa produz mensalmente cerca de 30,0% de toda a produção nacional de painéis aglomerados (ou 35.000 m³ por mês), e seus produtos são utilizados por produtoras de móveis para uso comercial e residencial. Portanto, como ilustrado na Figura 45, o painel aglomerado trata-se de um produto intermediário, e não de um produto final.

Figura 45 – Visão geral do painel aglomerado e de algumas de suas aplicações na indústria moveleira
 Fonte: imagens obtidas das empresas visitadas nesta pesquisa

O produto da Figura 45 se refere ao painel de partículas de média densidade, classificado como um material compósito. Trata-se de um produto composto por matriz de adesivo sintético e fase de reforço de partículas de madeira dispostas em três camadas, sendo duas camadas de superfície constituídas por partículas com menores dimensões, e a camada interna, formada por partículas maiores. O adesivo é composto por resina ureia formaldeído e aditivos (emulsão de parafina, catalisadores), enquanto que as partículas são oriundas de espécies reflorestadas de madeira de eucalipto (SILVA, 2012; SILVA et al., 2013b).

O painel aglomerado pode ser comercializado principalmente em função de sua espessura e do tipo de revestimento. Assim, durante a **Etapa 1** do procedimento de *GM* desenvolvido, primeiro foi utilizada a ferramenta **Matriz de Priorização de Produtos** para a seleção da configuração do produto de interesse, conforme os resultados do Quadro 24.

Pelo Quadro 24, os produtos prioritários foram o painel com 15,0 mm de espessura, com e sem revestimento. Todavia, a indústria estudada escolheu apenas o painel sem revestimento, pois sua representatividade *R* no volume de vendas da empresa foi mais expressiva. Portanto, o produto selecionado foi a chapa de madeira aglomerada com espessura nominal de 15,0 mm e sem revestimento. Já a largura e o comprimento nominais do painel escolhido foram, respectivamente, de 1840,0 mm e 2750,0 mm.

	Lista de produtos da indústria	R	T	C	MA	R x T x C x MA	Ordem de prioridades
1.	Painel cru, sem revestimento (esp. 15,0 mm)	5	5	3	3	225	1º lugar
2.	Painel cru, sem revestimento (esp. 7,0-12,0 mm)	3	3	3	3	81	3º lugar
3.	Painel cru, sem revestimento (esp. 18,0-25,0 mm)	3	5	3	3	135	2º lugar
4.	Painel cru, sem revestimento (esp. > 25,0 mm)	3	3	3	3	81	3º lugar
5.	Painel com revestimento melamínico BP (esp. 15,0 mm)	3	5	5	3	225	1º lugar
6.	Painel com revestimento melamínico (esp. 7,0-12,0 mm)	3	3	5	3	135	2º lugar
7.	Painel com revestimento melamínico (esp. 18,0-25,0 mm)	3	3	5	3	135	2º lugar
8.	Painel com revestimento melamínico (esp. > 25,0 mm)	3	3	5	3	135	2º lugar
9.	Painel com revestimento <i>finish foil</i> (esp. 15,0 mm)	3	3	3	3	81	3º lugar
10.	Painel com revestimento <i>finish foil</i> (esp. 7,0-12,0 mm)	1	1	3	3	9	5º lugar
11.	Painel com revestimento <i>finish foil</i> (esp. 18,0-25,0 mm)	1	3	3	3	27	4º lugar
12.	Painel com revestimento <i>finish foil</i> (esp. > 25,0 mm)	1	3	3	3	27	4º lugar

Quadro 24 – Resultados da matriz de priorização do produto de interesse para o estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

Tendo definido o produto, em seguida, foram estabelecidas a UF e o FR no Quadro 25.

Produto	Função	Unidade funcional	Fluxo de referência
Painel aglomerado com 15,0 mm de espessura e sem revestimento	Servir de matéria prima para a manufatura de móveis.	O uso de um roupeiro com capacidade de armazenamento de 40,0 kg (ou 3,7 m³) de bens por 5 anos.	A produção de 235,0 kg de painéis aglomerados.

Quadro 25 – Produto, função, UF e FR do estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

Para a seleção da UF e do FR, foi utilizado como modelo o **roupeiro feito de painel aglomerado** avaliado por Iritani et al. (2015), que pesa 257,0 kg, possui dimensões de 2670

mm x 606 mm x 2323 mm, e sendo que os autores realizaram uma ACV para o produto no Brasil. A indústria abordada por Iritani et al. (2015) foi a mesma indústria moveleira visitada nesta tese para a coleta de informações sobre a fase de uso e de pós-uso dos painéis de madeira. Além disso, dados eventualmente indisponíveis em Iritani et al. (2015) foram coletadas durante a visita técnica feita na referida empresa.

O próximo passo da macroetapa de **pré-avaliação** foi a definição do sistema de produto, o qual é apresentado na Figura 46 numa perspectiva *cradle-to-grave*.

Figura 46 – Sistema de produto para o estudo de caso 1
Fonte: elaborado pelo autor

O sistema de produto da Figura 46 apresenta quatro etapas de CVP. A etapa de extração e beneficiamento de recursos fornece as matérias-primas e insumos necessários para a etapa de manufatura do painel aglomerado, a montagem do roupeiro de madeira, o

uso do móvel pelo consumidor final, o pós-uso, e as diversas atividades de transporte e de distribuição existentes no CVP. Recursos como a madeira, água, resina ureia-formaldeído, aditivos e eletricidade, são os principais fluxos de entrada consumidos durante a manufatura do painel aglomerado, conforme a Figura 47. Também se ressalta que a fase de uso do painel foi subdividida em duas partes: *uso 1*, referente ao uso do painel pela indústria moveleira; e *uso 2* referente ao uso do roupeiro de madeira pelo consumidor final.

Os processos elementares considerados na etapa de manufatura do painel aglomerado são detalhados na Figura 47, que apresenta o DFP com todos os fluxos de entrada e de saída para a UF do estudo. Detalhes sobre a quantificação das entradas e saídas do DFP serão apresentados durante a **Etapa 2** do procedimento de *GM*.

Figura 47 – Diagrama de fluxo de processo da etapa de manufatura – estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 47, os fluxos intermediários de cada processo estão destacados, por exemplo, a partir da *geração de partículas* são produzidos 205,6 kg de *flakers*, enquanto que na *prensagem à quente* são produzidos 234,9 kg de painel aglomerado. Esses fluxos

intermediários representam o FR individual de cada processo definido, os quais se remetem diretamente ao FR e a UF do Quadro 25.

Também se ressalta que esses processos elementares estão agregados em subsistemas por conta da indisponibilidade de informações para a estratificação dos dados em nível de cada operação de manufatura existente. Assim, as operações de manufatura que foram agregadas em cada processo elementar da Figura 47 serão detalhadas a seguir.

Geração de partículas

Pela Figura 48, a geração de partículas de madeira é composta por três operações de manufatura: **descascamento**, **picagem** e **cepilhamento**. O processo se inicia no pátio de toras, onde a madeira bruta extraída do campo fica armazenada ao chegar na fábrica. Em geral, as toras são provenientes de espécies de eucalipto e apresentam 6 metros de comprimento, e densidade média de 474 kg/m³ (base seca) (SILVA, 2012).

Figura 48 – Operações de manufatura agregadas no processo de *geração de partículas*

Fonte: elaborado pelo autor

De lá, as toras são levadas para a operação de descascamento, onde são retiradas as cascas da madeira, que podem ocupar de 10-15% do volume das toras (IWAKIRI, 2005). O equipamento utilizado no descasque é o tambor rotativo de fricção. A casca retirada é aproveitada como biomassa na geração de energia térmica, enquanto que as toras descascadas seguem para a operação de picagem. Na picagem de toras emprega-se um picador florestal que fragmenta as toras em pequenos pedaços conhecidos por cavacos ou *chips*, com dimensões médias de 50 x 50 x 4 mm (SILVA, 2012). Após a picagem, os cavacos são dirigidos para processamento num conjunto de equipamentos denominados moinhos martelo, cepilhadores ou *ring flakers*. Nesta operação, os cavacos são reduzidos a partículas de madeira chamadas *flakes*.

Secagem e classificação de partículas

Na Figura 49, há quatro operações de manufatura: **secagem**, **classificação vibratória**, **classificação a ar**, e **cipilhamento**. O processo inicia com a operação de secagem dos *flakes* com o gás quente oriundo da planta de energia. A etapa de secagem ocorre em secadores de tubos rotativos, de um ou três passos. Iwakiri (2005) explica que a umidade dos *flakes* é reduzida a valores abaixo dos 3,0% na saída do secador e o processo de secagem ocorre a uma temperatura média de 180,0°C. A planta de energia é responsável por suprir parte da demanda energética da fábrica principalmente para os processos de secagem de partículas e de prensagem à quente, porém, ela não foi incluída dentro do sistema de produto definido. Afinal, a planta de energia é vista como um processo auxiliar e não um processo de manufatura, logo, o mesmo foi excluído do escopo de aplicação deste procedimento de *GM*.

Figura 49 – Operações de manufatura agregadas no processo de *secagem e classificação de partículas*
Fonte: elaborado pelo autor

Depois da secagem, as partículas secas são classificadas através de peneiras vibratórias e classificadores pneumáticos. As partículas são separadas conforme suas dimensões em quatro grupos: *oversize*, material de camada interna do painel (CI), material de camada externa do painel (CE), e pó. As partículas *oversize* são maiores que as de CI, que têm maiores dimensões do que as de CE, que por sua vez, são maiores que o pó. Nas peneiras, as

partículas são separadas em material de camada externa, pó e uma mistura “CI + *oversize*”. O material de CE segue para seu silo de armazenamento e o pó é queimado na planta de energia. A mistura “CI + *oversize*” segue para a classificação pneumática, onde o material de CI é separado do *oversize* por gravimetria. O material de CI segue para um silo de armazenagem. As partículas *oversize* são dirigidas para moinhos cepilhadores que fazem sua redução de tamanho, e depois as partículas retornam ao processo como material de CE.

Encolagem e formação do colchão

A Figura 50 apresenta duas operações de manufatura: **encolagem** e **formação do colchão**. As partículas de CE e CI armazenadas nos silos seguem primeiramente para a operação encolagem, onde elas são misturadas ao adesivo sintético. A porcentagem de resina aplicada pode variar de 9,0-12,0% do peso das partículas de madeira, e a emulsão de parafina até 1,0% do peso do sólido resinoso (IWAKIRI, 2005).

Figura 50 – Operações de manufatura agregadas no processo de *encolagem e formação do colchão*

Fonte: elaborado pelo autor

O processo de encolagem visa misturar as partículas de madeira com o adesivo, que é normalmente pulverizado dentro das encoladeiras. Então, as partículas encoladas são direcionadas para estações espalhadoras chamadas formadoras, que distribuem o material formando um colchão, onde as partículas de CI são dispostas na região central do painel, e as partículas de CE são dispostas nas superfícies do painel, formando três camadas.

Prensagem à quente

Na Figura 51, duas operações de manufatura são realizadas: a **pré-prensagem** e a **prensagem**. O colchão formado passa primeiro pela pré-prensagem que compacta o mesmo retirando o excesso de ar localizado no interior do colchão. Feito isso, o colchão segue para a operação de prensagem à quente, que ocorre normalmente utilizando uma prensa contínua. A prensagem visa consolidar o painel aglomerado até a espessura desejada, por meio da

aplicação combinada de pressão (12,0-40,0 kgf/cm²) e temperatura (de 150,0-190,0°C), promovendo a reação química do adesivo (cura da resina) e a adesão das partículas.

Figura 51 – Operações de manufatura agregadas no processo de *prensagem à quente*
Fonte: elaborado pelo autor

Acabamento e embalagem

O painel de madeira consolidado, antes de sua expedição, primeiramente deve passar pelas quatro operações de manufatura da Figura 52: **corte**, **resfriamento**, **lixamento** e **embalamento**. Primeiro, o painel aglomerado é cortado utilizando serras diagonais e longitudinais, que usinam, respectivamente, o painel nos sentidos de sua largura e comprimento. Após a uniformização de suas dimensões, o painel é acondicionado em resfriadores giratórios. Cada painel resfriado passa por um período de maturação em estoque por 24-72 horas. Depois, os painéis são lixados em uma linha de acabamento com lixadeiras que uniformizam a espessura dos painéis e removem irregularidades das suas superfícies.

Figura 52 – Operações de manufatura agregadas no processo de *acabamento e embalagem*
Fonte: elaborado pelo autor

Os painéis lixados são estocados em galpões, formando pacotes com altura típica de 600 mm. Na formação dos pacotes, consomem-se materiais como fita poliéster e cantoneiras de papelão para proteção dos pacotes. Em média, para a chapa de 15,0 mm de espessura, 1 m³ de painel representa 630,0 kg do material a 5,0-11,0% de umidade (SILVA, 2012).

Como visto, diversas operações de manufatura são realizadas para cada processo elementar destacado anteriormente na Figura 47. Assim, durante a **Etapa 5** será abordada a desagregação do(s) processo(s) elementar(es) de maior interesse neste estudo em nível de suas operações de manufatura, para assim ser possível realizar a macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental** segundo o procedimento de *GM* proposto nesta tese.

Resultados da pré-avaliação: Etapa 2

Para a **Etapa 2**, os dados de ICV foram obtidos de fontes primárias e secundárias. Os dados primários foram coletados conforme a metodologia de estudo de caso descrita na seção 3.2.2, para o inventário dos aspectos ambientais das etapas de manufatura, *uso 2*, e pós-uso do painel aglomerado. Já os dados secundários foram extraídos de Silva (2012) e Silva et al. (2013b) para o inventário *cradle-to-gate* do painel, de Iritani et al. (2015) para os aspectos ambientais da fase de *uso 1* do produto, e de Micales e Skog (1997) para o pós-uso do produto. É importante enfatizar que os dados referentes à manufatura do painel, embora tenham sido extraídos de Silva (2012) e Silva et al. (2013b), eles também foram atualizados durante as visitas técnicas ocorridas na indústria produtora de painéis aglomerados.

Os fluxos diretos são apresentados na Tabela 6, sendo que os principais aspectos ambientais durante a manufatura foram o consumo de eletricidade, madeira, água e resina ureia-formaldeído. Já para a quantificação dos fluxos indiretos, foram utilizados os bancos de dados do software GaBi Professional 6.5 e dados da literatura conforme o Quadro 26.

No Quadro 26, nota-se que a maior parte dos fluxos indiretos de inventário foram obtidos através dos bancos de dados do software GaB 6.5. Foi assumido o critério de corte mássico de 95,0% de todos os fluxos de entrada diretos do sistema de produto. Além disso, a maior parte desses dados foi coletada para as condições brasileiras, enquanto que somente uma parcela menor dos fluxos foram obtidos de países estrangeiros pela indisponibilidade de dados nacionais para os insumos: aço, polietileno, parafina, papelão e tinta. Os fluxos indiretos devido à construção do maquinário e equipamentos industriais utilizados na manufatura não foram incluídos na **pré-avaliação**, devido à complexidade de incluir essas informações para cada um dos cinco processos elementares estabelecidos para o sistema de produto. Por outro lado, durante a macroetapa de **avaliação e monitoramento**, essas informações foram levantadas, mas com foco somente no processo de manufatura de maior interesse.

Tabela 6 – Resultados do ICV para o estudo de caso 1

	Entradas		Saídas	
Manufatura	▪ Diesel (transporte de insumos e matérias primas)*	0,6 kg	▪ Dióxido de carbono*	1,9 kg
			▪ Monóxido de carbono*	0,002 kg
	<i>Geração de partículas</i>			
	▪ Energia elétrica	53,0 MJ	▪ Cascas de madeira	14,4 kg
	▪ Toras de madeira	256,4 kg	▪ Outros resíduos de madeira	36,3 kg
	<i>Secagem e classificação de partículas</i>			
	▪ Energia elétrica	6,6 MJ	▪ Compostos orgânicos voláteis	0,1 kg
	<i>Encolagem e formação do colchão</i>			
	▪ Água	32,3 kg	▪ Efluente líquido	32,1 kg
	▪ Aditivos	2,6 kg	▪ Sólidos suspensos	0,003 kg
	▪ Energia elétrica	6,6 MJ		
	▪ Resina ureia-formaldeído	26,7 kg		
	<i>Prensagem à quente</i>			
	▪ Energia elétrica	39,7 MJ	▪ Formaldeído livre	0,05 kg
	<i>Acabamento e embalagem</i>			
Uso	▪ Energia elétrica	26,5 MJ	▪ Lixas usadas	0,02 kg
	▪ Fita de borda	0,07 kg	▪ Painel aglomerado	235,0 kg
	▪ Lixas	0,02 kg		
	▪ Papelão	0,08 kg		
	<i>Uso 1: manufatura do móvel</i>			
	▪ Acessórios plásticos	9,1 kg	▪ Dióxido de carbono*	2,1 kg
	▪ Acessórios metálicos	15,7 kg	▪ Monóxido de carbono*	0,003 kg
	▪ Colas e adesivos	0,7 kg	▪ Resíduos de painel aglomerado	8,4 kg
	▪ Diesel (distribuição do painel aglomerado)*	0,7 kg	▪ Resíduos de tintas e vernizes	0,7 kg
	▪ Energia elétrica	333,6 MJ	▪ Roupeiro de madeira	278,7 kg
	▪ Painel aglomerado	235,0 kg		
	▪ Papelão	22,2 kg		
	▪ Tintas	4,8 kg		
	<i>Uso 2: uso do móvel</i>			
	▪ Diesel (distribuição do roupeiro de madeira)*	4,9 kg	▪ Dióxido de carbono*	14,8 kg
Pós-uso	▪ Roupeiro de madeira	278,7 kg	▪ Monóxido de carbono*	0,03 kg
			▪ Resíduos de papelão	22,2 kg
			▪ Roupeiro de madeira usado	256,5 kg
	<i>Disposição em aterro</i>			
	▪ Diesel (destinação do roupeiro de madeira)*	0,8 kg	▪ Dióxido de carbono*	2,6 kg
Pós-uso			▪ Dióxido de carbono**	3,3 kg
			▪ Metano**	4,9 kg
	▪ Roupeiro de madeira usado	256,5 kg	▪ Monóxido de carbono*	0,004 kg

* Emissões de CO₂ e CO diretamente relacionados ao consumo de diesel;** CO₂ e CH₄ emitidos devido à decomposição da chapa de madeira em aterro sanitário.

Fonte: elaborado pelo autor

Descrição	Fontes de dados	Nação de origem
Cadeia de produção do aço (material base que compõe os acessórios metálicos)	PE International (2015c)	Global
Cadeia de produção do diesel combustível	PE International (2015a)	Brasil
Cadeia de produção da energia elétrica	PE International (2015f)	Brasil
Cadeia de produção da madeira de eucalipto	Silva et al. (2013b)	Brasil
Cadeia de produção da parafina	NREL (2009)	Estados Unidos
Cadeia de produção da resina ureia-formaldeído	Silva (2012)	Brasil
Cadeia de produção do papelão	PE International (2015j)	Europa
Cadeia de produção do polipropileno (material base que compõe os acessórios plásticos)	PE International (2015o)	Europa
Cadeia de produção do sulfato de amônio	Ribeiro (2009)	Brasil
Cadeia de extração e de fornecimento de água (material base que compõe a tinta utilizada na pintura do móvel de madeira)	PE International (2015m)	Alemanha

Quadro 26 – Fonte de dados para os fluxos indiretos de inventário – estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

Na Tabela 6, para a etapa de manufatura do produto alterações foram realizadas nos dados originais de ICV disponíveis em Silva (2012) e Silva et al. (2013b), de acordo com as visitas técnicas feitas na indústria produtora de painel aglomerado, sendo:

- Silva (2012) e Silva et al. (2013b) destacaram o consumo de resíduos de madeira (38,5 kg/m³ de painel) e de óleo combustível pesado (13,7 kg/m³ de painel) na planta de energia para geração de calor e vapor. Porém, ficou excluída a inclusão destes recursos neste estudo;
- Os dados originais apresentaram o consumo de energia elétrica de 507,0 MJ/ m³ de painel produzido. Por outro lado, apenas 70,0% deste consumo está atrelado diretamente ao processo de fabricação do produto, portanto, 354,9 MJ/m³. Assim, de acordo com o FR de 235,0 kg de painel aglomerado, e considerando a densidade do painel de 630,0 kg/m³, foi inventariado o consumo total de 132,4 MJ de eletricidade. Este consumo total de eletricidade foi estratificado entre os cinco processos elementares da Figura 47 com base na potência nominal das máquinas envolvidas e no tempo de processamento de cada uma;
- A entrada dos 256,4 kg de madeira no processo produtivo ocorre no processo elementar *geração de partículas*. Contudo, para efeito do cálculo dos impactos potenciais na **Etapa 3**, o consumo total de madeira foi dividido proporcionalmente entre os cinco processos de manufatura, conforme a quantidade de resíduos gerados em cada processo. Por exemplo, pela Tabela 6, a *geração de partículas* gera 14,4 kg de cascas de madeira e mais 36,3 kg de outros resíduos de madeira, logo, sua contribuição para os impactos da cadeia de produção da madeira seriam (14,4 kg + 36,3 kg) / 256,4 kg de madeira. Afinal, caso isto não

fosse feito, todos os impactos da cadeia de produção da madeira seriam atribuídos somente ao processo de *geração de partículas*, superestimando os impactos potenciais do mesmo e subestimando os impactos dos demais processos. Seguindo esta mesma linha de raciocínio, o consumo de 26,7 kg de resina ureia-formaldeído também foi rateado proporcionalmente entre os processos *encolagem e formação do colchão*, e *prensagem à quente*, para efeito de distribuição dos impactos da cadeia de produção da resina entre aqueles processos de manufatura diretamente associados ao mesmo;

- Para a modelagem do sistema de produto da Figura 46 no software GaBi, foram incluídas as atividades de transporte de insumos e de matérias primas de acordo com as distâncias de transporte assumidas por Silva et al. (2013b). No software GaBi, escolheu-se o processo “GLO: Truck PE”, Euro 3, com carga padrão de 27,0 t, para representar a maioria dos sistemas de transporte existentes na modelagem. Desse modo, foi adicionado o consumo total de 0,6 kg de diesel por UF para as atividades de transporte até a produtora de painéis.

Para a fase de uso do painel foram realizadas as seguintes considerações:

- Durante a modelagem da subetapa *uso 1* no software GaBi, foi escolhido o processo “GLO: Truck ELCD/PE-GaBi”, Euro 3, e carga de 12,0 t para representar a atividade de distribuição do painel até a produtora de móveis. A distância de transporte foi assumida em 200,0 km. Assim, o consumo total de diesel por UF foi de 0,7 kg;
- Todos os fluxos de entrada e de saída inventariados para a manufatura do roupeiro foram extraídos de Iritani et al. (2015). Todavia, o dado original sobre a geração de resíduos de painel aglomerado foi alterado de 29,9 kg para 8,4 kg para efeito de fechamento do balanço mássico das entradas e saídas durante a manufatura do móvel;
- Para a subetapa *uso 2*, de acordo com os dados primários, foi assumida a distância de 1200,0 km para a distribuição do roupeiro até o consumidor, sendo esta atividade modelada no software GaBi utilizando o processo “GLO: Truck ELCD/PE-GaBi”, Euro 3, e carga de 12,0 t. O principal destino do produto estudado é sua comercialização nas redes lojistas da região sudeste do país, responsável por 60,0% das vendas do roupeiro;
- No *uso 2*, também foi incluída a geração de 22,0 kg resíduos sólidos de papelão provenientes do processo de embalagem do móvel durante o *uso 1*. Conforme a empresa produtora do móvel, para a vida útil de 5 anos do produto, a manutenção do roupeiro pelo consumidor final se baseia apenas na sua limpeza empregando pano macio e seco, sendo proibido utilizar qualquer material líquido. Assim, não foram considerados no modelo os aspectos ambientais relacionados a manutenção do roupeiro.

Por fim, em relação a etapa de pós-uso do produto:

- Após o término de sua vida útil, foi assumido o descarte do móvel de madeira em aterro sanitário localizado a 100,0 km de distância do consumidor final. Este cenário foi modelado com base em estimativas da empresa visitada;
- Para a modelagem da atividade de destinação do roupeiro de madeira, foi utilizado o software GaBi e escolhido o processo GLO: Truck PE”, Euro 3, e carga de 12,0 t. Para a distância de 100,0 km, o consumo total de diesel por UF foi de 0,8 kg;
- A decomposição do móvel de madeira em aterro sanitário foi modelada tendo como referência o estudo de Garcia (2010). Assim, foi considerado o uso de aterro sem recuperação de biogás (CH₄). As emissões de CO₂ e CH₄ oriundos da decomposição da madeira foram calculadas a partir de Micales e Skog (1997), sendo a geração de CO₂ equivalente a 1,3% do peso seco do painel, e de 1,9% para a geração de CH₄.

Resultados da pré-avaliação: Etapa 3

Na Figura 53 são apresentados os resultados da **Etapa 3 da pré-avaliação**. Para a avaliação dos impactos no CVP foi utilizado o método ILCD/PEF recommendation v. 1.06 (EC/JRC/IES, 2010b), e foram analisadas treze categorias de impacto, sendo: Potencial de Acidificação (PA), Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (PDCO), Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (fóssil e mineral) (PDRA), Potencial de Eutrofização para Água Doce (PEAD), Potencial de Ecotoxicidade para Água Doce (PEcAD), Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio (PFFO), Potencial de Formação de Material Particulado/Inorgânicos Respiratórios (PFMP), Potencial de Eutrofização Marinha (PEM), Potencial de Eutrofização Terrestre (PET), Potencial de Radiação Ionizante (PRI), Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Carcinogênicos (PTHC), e Potencial de Toxicidade Humana – Efeitos Não Carcinogênicos (PTHNC). Além disso, os resultados da AICV foram normalizados conforme os fatores de normalização “PEF Pilot, incl biogenic carbon [Person equivalent]”, disponíveis no software GaBi 6.5.

Os resultados da Figura 53 foram obtidos aplicando-se a **Equação 1**, sendo observado que 81,1% dos impactos potenciais no CVP ocorreram para as categorias PAG, PDRA, PTHNC, PFFO, PA, e PTHC. Para essas categorias, os impactos se devem principalmente as etapas de *manufatura do painel aglomerado*, *uso 1* e *pós-uso*. Na etapa de *manufatura do painel aglomerado*, os principais *hotspots* identificados foram as emissões ao ar de **formaldeído livre** durante a **prensagem à quente** dos painéis; as emissões gasosas de **NO_x** e de **dióxido de enxofre**, ambos oriundos da cadeia de **produção da resina ureia-formaldeído** e da **madeira**; e as **emissões de GEE** (com destaque para o CO₂) devido a

cadeia de **produção da eletricidade** e da **madeira**. Já para o *uso 1*, os *hotspots* foram as emissões ao ar de **metais pesados** devido a cadeia de **produção do aço** utilizado na manufatura dos acessórios metálicos do roupeiro; além disso, também foi destaque as **emissões de GEE** oriundo da cadeia de **geração da eletricidade**. No *pós-uso*, o aspecto de destaque foi a emissão de **CH₄** oriunda da decomposição dos painéis em **aterro sanitário**.

Figura 53 – Resultados do AICV para o estudo de caso 1
Fonte: elaborado pelo autor

Em seguida, aplicando-se a **Equação 2** foi avaliado o grau de contribuição de cada processo elementar da etapa de manufatura sobre os impactos do CVP (ver Figura 54).

A Figura 54 destaca que os processos elementares com maior contribuição foram a *pressagem à quente*, a *geração de partículas*, e a *encolagem e formação do colchão*. Além disso, também é importante notar que a soma dos percentuais de impacto de cada categoria resulta em 16,8%, sendo esta a contribuição global da etapa de manufatura do painel aglomerado para com os impactos do CVP.

Contudo, a maior parte dos impactos da Figura 54 foram indiretos e não diretos, conforme abordado na Figura 55. Os impactos indiretos somaram 6,1% do total de impactos na Figura 55, e se devem aos fluxos elementares a montante no CVP. Por exemplo, os 0,8% dos impactos indiretos da *pressagem à quente* se devem à cadeia de produção de recursos energéticos (eletricidade) e materiais (madeira, resina ureia-formaldeído, etc.) consumidos pelo mesmo.

Figura 54 – Resultados do AICV por processo elementar da etapa de manufatura do painel aglomerado
 Fonte: elaborado pelo autor

Figura 55 – Resultados do AICV por processo elementar da etapa de manufatura do painel aglomerado – impactos diretos e indiretos
 Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 55, nota-se que 11,3% dos impactos (diretos e indiretos) no CVP estudado ocorreram para a *prensagem à quente*. Apenas a *prensagem à quente*, e a *secagem e classificação de partículas* apresentaram impactos diretos, sendo que todos os demais mostraram somente impactos indiretos para o ciclo de vida do roupeiro de madeira. Isto significa que apenas na *prensagem à quente*, e na *secagem e classificação de partículas* há emissões diretas para o meio ambiente, respectivamente, devido as liberações ao ar de formaldeído durante a prensagem, e de VOCs durante a secagem das partículas de madeira.

Resultados da pré-avaliação: Etapa 4

Os processos elementares da etapa de manufatura foram enquadrados conforme as situações de referência A, B e C do procedimento de *GM*, sendo que os critérios adotados para a classificação em tipo A e B foram alterados de 5,0% para 3,0%. Assim, pelos resultados da Figura 55, apenas a *prensagem à quente* foi classificada na situação A, e a *geração de partículas* ficou enquadrada na situação B. Os demais processos não foram classificados devido a baixa contribuição deles para os impactos potenciais calculados.

Visando identificar a existência de processos elementares enquadrados na situação de referência C, foi utilizada a ferramenta do **Apêndice D**. Conforme a seção D.1 do **Apêndice D**, os requisitos técnicos de destaque foram as propriedades físicas do painel aglomerado (i.e., densidade, espessura e inchamento em espessura), pois elas podem afetar a magnitude dos impactos ambientais durante as etapas de *uso 1* e o *pós-uso* do produto. Desse modo, as propriedades físicas do painel foram correlacionadas aos processos elementares da etapa de manufatura da chapa aglomerada, sendo que o processo *prensagem à quente* foi classificado como **muito relevante**, e portanto, enquadrado dentro da situação de referência C; os demais processos elementares foram classificados como **pouco relevantes**.

Finalmente, os resultados da **Etapa 4** são sumarizados mediante a aplicação da **Matriz de Priorização de Processos**, conforme o Quadro 27. Cada processo elementar da etapa de manufatura do painel aglomerado foi classificado em Tipo I, II, ou III.

Com base nos resultados do Quadro 27 foi selecionado o processo de *prensagem à quente* para estudo durante a macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**, pois se trata de um processo Tipo II, que integra as situações de referência A e C. A *geração de partículas* apareceu na segunda colocação, tendo sido classificada como Tipo III, por envolver apenas a situação de referência B. Já os demais processos elementares foram descartados, pois não foram classificados em nenhuma das situações A, B, e C.

Processo elementar da etapa de manufatura	Categorias de impacto ambiental de destaque	Aspectos ambientais de destaque	Tipo de processo (I, II ou III)	Ordem de prioridade
Prensagem à quente	PTHC	- Emissão ao ar de formaldeído livre.	Tipo II	1º
	PFFO	- Emissão ao ar de formaldeído livre.		
	PAG	- Emissão ao ar de CO ₂ devido ao consumo de eletricidade.		
Geração de partículas	PAG	- Emissão ao ar de CO ₂ devido ao consumo de eletricidade, e de madeira.	Tipo III	2º
	PA	- Emissão ao ar de dióxido de enxofre devido ao consumo de madeira.		
Secagem e classificação de partículas	-	-	-	Descartado
Encolagem e formação do colchão	-	-	-	Descartado
Acabamento e embalagem	-	-	-	Descartado

Quadro 27 – Matriz de priorização de processos para o estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 5

Primeiramente foi redefinido os limites de fronteira do processo de manufatura selecionado na **pré-avaliação**. Afinal, o processo de *prensagem à quente* havia sido agregado conforme o subsistema da Figura 51, incluindo além da prensagem à quente a atividade de pré-prensagem do colchão de partículas.

Pelos resultados das entrevistas junto à produtora de painéis (ver a **parte 2** do modelo de questionário do **Apêndice E**), foi determinada a prensagem à quente como aquela mais relevante tendo em vista os *hotspots* do Quadro 27 da **Etapa 4**. Portanto, a macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental** focou somente na prensagem à quente.

Para o processo de prensagem à quente, então, um estudo experimental foi realizado para a prensa situada no LaMEM-EESC-USP (rever seção 3.2.3). Para essa máquina, os aspectos ambientais a serem monitorados assim como suas subunidades são apresentadas na Figura 56. Já os modos de operação vigentes foram os **modos não produtivos A** (iniciação) e **D** (espera), e o **modo produtivo B** (prensagem).

Figura 56 – Limites de fronteira do processo de prensagem à quente
Fonte: elaborado pelo autor

Analisando a Figura 56, o fluxo de entrada principal foi o colchão de partículas após a pré-prensagem, enquanto que o consumo de eletricidade foi o único recurso de entrada. A emissão de formol livre também foi destacada, assim como as três subunidades da prensa.

Os aspectos ambientais a serem monitorados foram classificados na **Matriz de Relacionamentos** do Quadro 28. Sobre os fluxos indiretos, foram utilizadas as mesmas fontes de dados previamente mencionadas no Quadro 26 da **Etapa 2**. Todavia, também foram incluídos aqui os fluxos indiretos devido à construção do maquinário utilizado no processo de prensagem, como mostra o **Diagrama de Relações** da Figura 57.

Aspectos ambientais	Subunidade	Modos de operação		
		A	B	D
Consumo de eletricidade	Subunidade de aquecimento	X	X	X
Consumo de eletricidade	Subunidade hidráulica		X	X
Emissão de formaldeído livre ao ar	Subunidade de prensagem		X	

Quadro 28 – Matriz de Relacionamentos para o estudo de caso 1: aspectos ambientais, subunidades e modos de operação

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 57 – Diagrama de relações dos materiais e componentes utilizados na construção da prensa hidráulica
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 57, dos 290,0 kg da prensa hidráulica, 230,0 kg de seus materiais e componentes foram incluídos no estudo, sendo: ferro fundido (125,0 kg), aço inox (40,0 kg), bomba hidráulica (45,0 kg), e óleo hidráulico (20,0 kg). Para estes materiais e componentes, foi utilizado o banco de dados do software GaBi 6.5 para inclusão de seus respectivos fluxos indiretos de inventário conforme mostrado no Quadro 29. Além disso, o fator f foi calculado com base nas **Equações 10 e 11**, resultando em $6,35E-06$ por UF.

Utilizando o questionário do **Apêndice E**, foram definidos os parâmetros de processo e os RTQP. Assim, com base nos parâmetros de processo, foram estabelecidos os tratamentos/condições experimentais (CEx) do Quadro 30. Então, ao final da aplicação de cada tratamento foram determinados os requisitos técnicos de qualidade de cada painel

aglomerado, com foco somente naqueles requisitos julgados como relevantes para o CVP, i.e., *densidade, espessura e inchamento em espessura* da chapa aglomerada.

Descrição	Fontes de dados	Nação de origem
Cadeia de produção do ferro fundido (mix de 65,0% ferro virgem/primário e 35,0% ferro reciclado/secundário)	PE International (2015d)	Global
Cadeia de produção do aço inox (recozido e decapado, rota EAF – inclui Cr, Ni, e Mo como elementos de liga)	PE International (2015p)	Alemanha
Cadeia de produção da bomba hidráulica (800 W, para uso industrial)	PE International (2015e)	Global
Cadeia de produção do óleo hidráulico (tipo não especificado)	PE International (2015l)	Europa

Quadro 29 – Fonte de dados para os fluxos indiretos dos materiais e componentes da prensa hidráulica

Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 30 há 12 CEx, sendo que o número de repetições para cada CEx foi igual a 3. Assim, a **Matriz de Monitoramento Ambiental do Processo** foi preenchida para um total de 36 experimentos delineados, e os resultados são apresentados a seguir.

Fatores de entrada		Níveis experimentais			
Parâmetros (Definidos no Quadro 8 da seção 3.2.3)	Unidade	Valor mínimo	...		Valor máximo
Temperatura	°C	160,0	165,0		170,0
Pressão	MPa	3,0	3,5	4,0	4,5

CEx	Composição entre os fatores
1	Pressão = 3,0MPa; Temperatura = 160,0°C
2	Pressão = 3,0MPa; Temperatura = 165,0°C
3	Pressão = 3,0MPa; Temperatura = 170,0°C
4	Pressão = 3,5MPa; Temperatura = 160,0°C
5	Pressão = 3,5MPa; Temperatura = 165,0°C
6	Pressão = 3,5MPa; Temperatura = 170,0°C
7	Pressão = 4,0MPa; Temperatura = 160,0°C
8	Pressão = 4,0MPa; Temperatura = 165,0°C
9	Pressão = 4,0MPa; Temperatura = 170,0°C
10	Pressão = 4,5MPa; Temperatura = 160,0°C
11	Pressão = 4,5MPa; Temperatura = 165,0°C
12	Pressão = 4,5MPa; Temperatura = 170,0°C

Quadro 30 – Condições experimentais estabelecidas para o monitoramento ambiental do processo de prensagem à quente – estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 6

O monitoramento do processo de prensagem foi realizado aplicando-se as **Equações 3b e 5**, e os resultados por tratamento conduzido estão na seção F.1 do **Apêndice F**. Os aspectos ambientais foram inventariados para a produção de uma chapa aglomerada, e depois, foram padronizados para o FR de 235,0 kg de painel aglomerado.

Os resultados da seção F.1 mostram que o consumo de eletricidade variou de 1,16 a 2,00 kWh, enquanto que as emissões de formaldeído variaram de 40,14 a 55,85 g por FR.

Sobre o consumo de eletricidade, na Figura 58 é apresentado um gráfico do monitoramento de potência em função do tempo de experimento para o tratamento – pressão 4,0 MPa e temperatura 160,0°C. Outras curvas equivalentes foram encontradas para os demais 11 tratamentos. Apesar da potência consumida no modo de iniciação ser maior do que nos demais modos de operação, é importante notar que a iniciação da máquina ocorre somente uma vez ao dia. Assim, esses valores de potência foram divididos 21 chapas, que representa o número máximo de chapas que podem ser produzidas por dia (turno de 8 h).

Figura 58 – Mapeamento da potência consumida em função do tempo de experimento – processo de prensagem à quente, 4,0 Mpa e 160,0°C

Fonte: elaborado pelo autor

Mesmo assim, conforme os resultados da seção F.1, o consumo de eletricidade foi maior para o modo de operação A (iniciação) na maioria dos tratamentos avaliados. Isso se deve ao longo tempo necessário para o aquecimento da prensa até a temperatura almejada.

Posteriormente, também foram incluídos os fluxos indiretos associados aos aspectos ambientais monitorados. Esta etapa da modelagem foi feita utilizando o software GaBi 6.5.

Sobre os RTQP, os resultados da seção F.1 mostram que a *densidade* dos painéis variou de 530,0 a 790,0 kg/m³, a *espessura* variou de 13,17 a 15,16 mm, e o *inchamento em espessura* foi de 4,05 a 13,89 %. Em seguida, esses resultados foram comparados com os requisitos previstos na norma NBR 14810-2:2013 (ABNT, 2013).

Feito isso, foram correlacionados os requisitos técnicos de qualidade de cada uma das chapas aglomeradas produzidas junto às etapas de *uso* e de *pós-uso* do produto. Para isso, a **Matriz de Relacionamentos** proposta na **Etapa 6** do procedimento de *GM* (seção 4.1.2) serviu como ferramenta para a coleta e organização dos dados, sendo que os resultados constam na seção G.1 do **Apêndice G**. O preenchimento da matriz ocorreu com base em visitas técnicas realizadas na empresa produtora do modelo de roupeiro estudado.

Pelos resultados da seção G.1, as etapas a jusante afetadas foram o *uso 1* e o *pós-uso*. O *uso 1* foi afetado com base nas variações nos consumos de eletricidade e de tinta para a manufatura do roupeiro; já a etapa de *pós-uso* foi afetada devido aos resultados das emissões de CO₂ e CH₄. Os consumos de eletricidade e de tinta durante a manufatura do roupeiro apresentaram, respectivamente, variações de 333,60 a 385,60 MJ, e de 4,80 a 5,28 kg. Já no pós-uso, as emissões de CO₂ foram de 3,00 a 4,10 kg, e de 4,30 a 6,10 kg para o CH₄.

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 7

Tendo finalizado o monitoramento ambiental do processo de prensagem, então os resultados dos aspectos inventariados foram transformados em impactos potenciais. Para isso, foi utilizado o mesmo método de AICV aplicado durante a **Etapa 3** (ILCD/PEF recommendation). Contudo, aqui somente foram avaliadas as categorias de impacto destacadas durante a **Etapa 4**, no caso, **PTHC**, **PFFO**, e **PAG**. Os resultados dos impactos para o CVP são sumarizados na Tabela 7 por tratamento.

Na Tabela 7, são apresentados os seguintes resultados de estatística descritiva: média ($\bar{x}$), desvio padrão (s), e valores de mínimo (Min) e de máximo (Máx) para cada um dos 12 tratamentos analisados. Os resultados mostram que para PTHC os impactos potenciais variaram de 1,47E-03 a 1,89E-03 CTUh, sendo que o tratamento 4,0 MPa e 170,0°C foi aquele que apresentou o maior resultado de impacto médio, i.e., $1,84E-03 \pm 4,57E-05$ CTUh. Já para PAG, os resultados variaram de 3,53E+02 a 4,66E+02 kg CO_{2-eq.}, sendo que a condição 4,5 MPA e 170,0°C resultou no maior impacto potencial médio $4,61E+02 \pm 4,54E+00$ kg CO_{2-eq.}. Por último, os impactos para a categoria PFFO foram de 9,61E+01 a 1,31E+02 kg de NMVOC, sendo que o maior impacto médio foi de $1,20E+02 \pm 2,54E+00$ kg de NMVOC, registrado para a condição experimental 3,5MPa e 170,0°C.

Tabela 7 – Resultados da AICV por tratamento – estudo de caso 1

Tratamentos	Estatística	PTHC (CTUh)	PAG (kg CO ₂ -eq.)	PFFO (kg NMVOC)
3,0MPa; 160,0°C	$\bar{x}$	1,53E-03	3,76E+02	1,00E+02
	s	7,35E-05	6,53E+00	4,81E+00
	Mín	1,47E-03	3,71E+02	9,61E+01
	Máx	1,61E-03	3,83E+02	1,05E+02
3,0MPa; 165,00°C	$\bar{x}$	1,67E-03	3,93E+02	1,09E+02
	s	3,49E-05	1,84E+01	2,28E+00
	Mín	1,63E-03	3,72E+02	1,07E+02
	Máx	1,70E-03	4,07E+02	1,11E+02
3,0MPa; 170,0°C	$\bar{x}$	1,77E-03	3,98E+02	1,16E+02
	s	9,19E-05	9,09E+00	6,01E+00
	Mín	1,67E-03	3,92E+02	1,10E+02
	Máx	1,85E-03	4,09E+02	1,22E+02
3,5MPa; 160,0°C	$\bar{x}$	1,69E-03	3,58E+02	1,11E+02
	s	1,66E-05	5,20E+00	1,08E+00
	Mín	1,67E-03	3,53E+02	1,10E+02
	Máx	1,71E-03	3,63E+02	1,12E+02
3,5MPa; 165,0°C	$\bar{x}$	1,69E-03	3,99E+02	1,11E+02
	s	1,78E-05	3,81E+00	1,16E+00
	Mín	1,67E-03	3,96E+02	1,10E+02
	Máx	1,71E-03	4,03E+02	1,12E+02
3,5MPa; 170,0°C	$\bar{x}$	1,82E-03	4,10E+02	1,20E+02
	s	3,88E-05	7,77E+00	2,54E+00
	Mín	1,78E-03	4,01E+02	1,17E+02
	Máx	1,85E-03	4,16E+02	1,21E+02
4,0MPa; 160,0°C	$\bar{x}$	1,73E-03	4,23E+02	1,10E+02
	s	5,87E-05	3,90E+00	2,03E+00
	Mín	1,68E-03	4,19E+02	1,08E+02
	Máx	1,79E-03	4,26E+02	1,12E+02
4,0MPa; 165,0°C	$\bar{x}$	1,70E-03	4,22E+02	1,13E+02
	s	2,92E-05	1,02E+01	2,78E+00
	Mín	1,68E-03	4,12E+02	1,10E+02
	Máx	1,73E-03	4,32E+02	1,15E+02
4,0MPa; 170,0°C	$\bar{x}$	1,84E-03	4,45E+02	1,19E+02
	s	4,57E-05	1,20E+01	2,95E+00
	Mín	1,80E-03	4,32E+02	1,17E+02
	Máx	1,89E-03	4,54E+02	1,22E+02
4,5MPa; 160,0°C	$\bar{x}$	1,76E-03	4,48E+02	1,13E+02
	s	7,79E-05	3,41E+00	9,38E-01
	Mín	1,70E-03	4,46E+02	1,12E+02
	Máx	1,85E-03	4,52E+02	1,14E+02
4,5MPa; 165,0°C	$\bar{x}$	1,55E-03	4,59E+02	1,16E+02
	s	2,52E-05	6,12E+00	1,43E+01
	Mín	1,52E-03	4,53E+02	1,03E+02
	Máx	1,57E-03	4,65E+02	1,31E+02
4,5MPa; 170,0°C	$\bar{x}$	1,66E-03	4,61E+02	1,14E+02
	s	1,58E-05	4,54E+00	6,46E+00
	Mín	1,64E-03	4,57E+02	1,09E+02
	Máx	1,67E-03	4,66E+02	1,22E+02

Fonte: elaborado pelo autor

Na **Etapa 9** da macroetapa de **pós-avaliação** serão detalhados os impactos potenciais da Tabela 7 levando-se em conta todas as etapas de CVP, os impactos diretos e indiretos da manufatura, os modos de operação e as subunidades do processo de prensagem à quente.

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 8

Para a **Etapa 8** do procedimento de *GM*, os resultados da AICV da Tabela 7 foram utilizados no modelo de ANOVA. Feito isso, o modelo de ANOVA foi validado e os resultados da validação são apresentados nas Figura 59 e 60.

Figura 59 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PTHC – estudo de caso 1.
Fonte: elaborado pelo autor

O resultados mostram que o modelo de ANOVA foi validado, pois para o teste de normalidade utilizando o método de Anderson-Darling (AD), o p-valor dos resíduos estatísticos foi maior que 5,0% tanto para PTHC (0,288) quanto para PAG (0,189). Nessa mesma linha, pelo teste de Bartlett (BT), também foi verificada a homogeneidade das

variâncias dos resíduos estatísticos para 95,0% de intervalo de confiança, sendo que para PTHC o p-valor foi de 0,950 e para PAG o p-valor foi de 0,981, logo, ambos superiores a 5,0% de significância. Por último, também foi verificada a independência dos resíduos estatísticos para o modelo de ANOVA tanto para PTHC quanto para PAG, pois não foi visualizado nenhum agrupamento ou aglomeração de resíduos.

Figura 60 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PAG – estudo de caso 1.
Fonte: elaborado pelo autor

Já na Figura 61 os resultados também convergiram para a validação do modelo de ANOVA para a categoria de PFFO. O p-valor para o teste de normalidade foi de 0,569, e o p-valor para o teste de homogeneidade foi de 0,219, portanto, superiores a 5,0%. Além disso, também não foi verificado agrupamento de resíduos pelo teste de independência.

Assim, os resultados da ANOVA após concluída a validação de suas premissas seguem na Tabela 8. Foi executada a ANOVA considerando-se os dois fatores investigados

(pressão e temperatura de prensagem) e a interação de ambos. Os P-valores da Tabela 8 considerados significativos pela ANOVA ($p\text{-valor} < 0,05$) encontram-se sublinhados.

Figura 61 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PFFO – estudo de caso 1.
Fonte: elaborado pelo autor

Pela Tabela 8 verifica-se que todos os fatores e a interação entre eles foram significativos, pois o $p\text{-valor}$ foi menor que 5,0%, a exceção para o efeito do fator pressão sobre a variável-resposta PFFO.

Tabela 8 – Resultados da ANOVA do planejamento experimental envolvendo os 12 tratamentos

Fatores	<u>PTHC</u>	<u>PAG</u>	<u>PFFO</u>
Pressão	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,081
Temperatura	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,002</u>
Pressão x Temperatura	<u>0,000</u>	<u>0,003</u>	<u>0,004</u>

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, as Tabela 9 e 10 apresentam os resultados do teste de Tukey dos fatores individuais pressão e temperatura, respectivamente, sendo “Ag” os agrupamentos formados.

Tabela 9 – Resultados do teste de Tukey para o fator pressão

Respostas	Estatística	Pressão			
		3,0MPa	3,50MPa	4,0MPa	4,5MPa
PTHC	$\bar{x}$	0,0016	0,0017	0,0018	0,0016
(CTUh)	Ag.	B	A	A	B
PAG	$\bar{x}$	388,89	388,78	430,33	456,00
(kg CO ₂ -eq.)	Ag.	C	C	B	A
PFFO	$\bar{x}$	108,54	113,89	114,00	114,44
(kg NMVOC)	Ag.	A	A	A	A

Fonte: elaborado pelo autor

Na Tabela 9 verifica-se que o efeito do aumento da pressão de prensagem tende a aumentar também os impactos potenciais avaliados. Os menores impactos para PTHC e PAG foram verificados para a pressão de 3,0MPa, seguida da pressão de 3,5MPa. O efeito da pressão para os impactos na categoria PFFO não foi relevante, pois o p-valor foi maior que 5,0%, e por isso, todos os grupos foram classificados apenas como “A”.

Tabela 10 – Resultados do teste de Tukey para o fator temperatura

Respostas	Estatística	Temperatura		
		160,0°C	165,0°C	170,0°C
PTHC	$\bar{x}$	0,0017	0,0016	0,0018
(CTUh)	Ag.	B	B	A
PAG	$\bar{x}$	401,25	418,17	428,58
(kg CO ₂ -eq.)	Ag.	C	B	A
PFFO	$\bar{x}$	108,58	112,25	117,33
(kg NMVOC)	Ag.	B	AB	A

Fonte: elaborado pelo autor

Em se tratando do efeito da temperatura de prensagem sobre os impactos no CVP, pela Tabela 10 constata-se que quanto maior a temperatura, maiores os impactos para PTHC, PAG e PFFO. Os menores impactos ocorreram para a temperatura de 160,0°C, seguida da temperatura de 165,0°C.

Pela Tabela 8, como a interação entre os fatores pressão e temperatura foi significativa na ANOVA, na Figura 62 são apresentados gráficos de interação por variável resposta. Os resultados mostram que para a categoria PTHC, o aumento da temperatura de 160,0°C para 170,0°C provocou um aumento nos impactos potenciais, sendo que as curvas para 4,0 MPa e 4,5 MPa foram similares. Para PAG, o aumento da temperatura de 160,0°C para 170,0°C gerou também um aumento dos impactos, e quanto maior a pressão de prensagem, maior foi a magnitude dos impactos, sendo que as curvas obtidas para 3,0 MPa e

3,5MPa foram similares. Por fim, para PFFO, para a pressão de 3,0MPa, o efeito do aumento da temperatura de prensagem sobre os impactos potenciais foi mais intenso do que nas demais curvas obtidas, sendo que no caso das pressões de 3,5, 4,0 e 4,5MPa, aumentando-se a temperatura de 160,0°C a 165,0°C, os impactos aumentaram numa proporção menor do que quando a temperatura foi aumentada de 165,0°C para 170,0°C.

Figura 62 – Gráficos de interação entre os fatores Pressão e Temperatura
Fonte: elaborado pelo autor

Desse modo, a partir dos resultados estatísticos da ANOVA é possível sintetizar os resultados do Quadro 31, tendo em vista a busca pela condição experimental que forneça os menores impactos potenciais para o CVP. Assim, pode-se afirmar que o melhor tratamento para atender simultaneamente as três categorias de impacto avaliadas seria a pressão de 3,0MPa e temperatura de prensagem de 160,0°C.

Porém, pelos resultados do **Apêndice F**, nem todos os RTQP do Quadro 31 seriam atendidos pelo tratamento 3,0MPa; 160,0°C, pois o requisito *espessura* da chapa apresentou alguns resultados abaixo da tolerância prevista na norma ABNT 14810-2:2013 (i.e., $15,0 \pm 0,3$ mm). Por outro lado, essa característica também foi verificada para os demais tratamentos, logo, a condição **3,0MPa; 160,0°C** foi mantida.

Categorias de impacto	Fatores	Melhores condições experimentais	Atende aos requisitos? (ver resultados no Apêndice F.1)		Melhor condição
PTHC	Pressão	3,0 MPa ou 4,5 MPa	Densidade (kg/m ³)	Sim	3,0MPa; 160,0°C
			Espessura (mm)	Parcialmente	
	Temperatura	160,0°C ou 165,0°C	Inchamento (%)	Sim	
PAG	Pressão	3,0 MPa ou 3,5 MPa	Densidade (kg/m ³)	Sim	
			Espessura (mm)	Parcialmente	
	Temperatura	160,0°C	Inchamento (%)	Sim	
PFFO	Pressão	*	Densidade (kg/m ³)	Sim	
			Espessura (mm)	Parcialmente	
	Temperatura	160,0°C	Inchamento (%)	Sim	

Quadro 31 – Síntese das melhores condições experimentais por categoria de impacto – estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

* Pelo teste de Tukey (rever Tabela 9), o efeito da pressão sobre o PFFO não foi significativo.

Resultados da pós-avaliação: Etapa 9

A partir da Tabela 7 da **Etapa 7**, é possível estratificar os resultados dos impactos e verificar como que os mesmos ocorrem na manufatura, em nível dos modos de operação e das subunidades existentes no processo de prensagem à quente, permitindo assim verificar em maior nível de detalhes os *hotspots* ambientais por categoria de impacto. Assim, as Figura 63 a 66 apresentam os resultados dos impactos potenciais estratificados para a melhor condição de prensagem estudada (**3,0MPa; 160,0°C**).

Os resultados da Figura 63 mostram que os impactos para PTHC estão intrinsecamente associados à etapa de manufatura do painel devido às emissões de formaldeído livre monitoradas no processo, sendo que esses impactos são diretos e ocorrem durante o modo de operação de prensagem à quente e para a subunidade de prensagem. Para esta categoria de impacto, não foram verificados impactos significativos para os demais modos de operação e subunidades da máquina, logo, o foco aqui deve ser a redução das emissões de formol livre devido ao uso da resina à base de formaldeído no processo produtivo.

Na Figura 64 são estratificados os resultados dos impactos potenciais para PAG, conforme as etapas do CVP, impactos diretos e indiretos, os modos de operação e as subunidades envolvidas. Constatou-se que 50,82% dos impactos para PAG estão associados a extração e beneficiamento de recursos, enquanto que aproximadamente 50,00% dos

demais impactos se devem às etapas a jusante da manufatura, com destaque para o pós-uso (29,72%). Não houve impactos diretos da etapa de manufatura para PAG, mas sim apenas impactos indiretos, dos quais 89,99% ocorreram durante a iniciação do processo, principalmente para a subunidade de aquecimento (93,50%). Isso se deve ao consumo de eletricidade para a operação de prensagem à quente, especialmente para o aquecimento dos pratos da prensa hidráulica. Assim, reduzir a temperatura de operação da prensa seria uma alternativa para a redução dos impactos potenciais.

Figura 63 – Análise de *hotspots* do processo de prensagem à quente – PTHC (CTUh)
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 64 – Análise de *hotspots* do processo de prensagem à quente, parte 1 – PAG (kg CO₂-eq.)

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 64 também mostra que os impactos potenciais para PAG estiveram também fortemente associados às etapas de **uso** e de **pós-uso** do produto. Assim, a seguir, na Figura 65 os impactos para PAG foram analisados utilizando as ferramentas **Gráfico de Dispersão** e **Análise de Sensibilidade**, no intuito de averiguar como que a etapa de manufatura pode influenciar os impactos a jusante da manufatura.

Figura 65 – Análise de *hotspots* do processo de prensagem à quente, parte 2 – PAG (kg CO₂-eq.)

Fonte: elaborado pelo autor

Pela Figura 65, utilizando gráficos de dispersão foi verificado como que os requisitos técnicos *densidade* e *espessura* estão correlacionados aos impactos para PAG, sendo que o requisito *densidade* se mostrou positivamente correlacionado aos impactos (dados dispersos em dois grupos), e a *espessura* não apresentou correlação/associação. Para o requisito *inchamento em espessura*, também não foi verificada nenhuma correlação.

Assim, foi realizada uma **Análise de Sensibilidade** variando os valores de densidade do painel, sendo verificado que os impactos para o pós-uso variaram em $\pm 7,0\%$, devido principalmente às emissões de CH₄ provenientes da decomposição da madeira em aterro sanitário. Já para a etapa de uso, os impactos variaram em menos de 1,0%, pois a maior parte dos impactos estão associados às emissões de CO₂ durante o *uso 1* (oriundas do consumo de eletricidade e da produção de peças metálicas utilizadas no móvel de madeira). Logo, o processo prensagem à quente dos painéis de madeira pode influenciar de maneira mais significativa apenas durante o pós-uso do produto.

Por fim, em relação à Figura 66, os resultados e conclusões foram equivalentes ao previamente discutido na Figura 63, sendo as emissões ao ar de formaldeído livre o principal *hotspot* para PFFO, com destaque ao modo de operação e subunidade de prensagem.

Figura 66 – Análise de *hotspots* do processo de prensagem à quente – PFFO (kg NMVOC)

Fonte: elaborado pelo autor

Da análise de *hotspots* é possível resumir o Quadro 32 e concluir que os impactos no ciclo de vida do painel aglomerado estão fortemente associados à etapa de prensagem à quente, principalmente para PTHC e PFFO, sendo necessário eliminar/reduzir as emissões locais de formol livre durante o processo de fabricação. Cerca de 50,00% dos impactos para PAG se devem ao consumo de eletricidade durante o processo de aquecimento da prensa, assim, reduzir a temperatura de trabalho seria uma alternativa para minimizar os impactos na manufatura. Ademais, a outra metade dos impactos potenciais para PAG ocorreram à jusante da manufatura e o requisito de qualidade densidade do painel de madeira pode influenciar na magnitude desses impactos, especialmente durante o pós-uso do produto. Portanto, durante o processo de prensagem é importante que a densidade das chapas produzidas seja reduzida, pois quanto maior a densidade, maiores serão os impactos para PAG no pós-uso.

Categorias de impacto	Detalhamento dos <i>hotspots</i> ambientais		
	Etapas do CVP de destaque	Principais aspectos ambientais	Possível solução para reduzir/eliminar o <i>hotspot</i>
PTHC	Manufatura	Emissão ao ar de formaldeído livre durante a prensagem à quente.	- Reduzir o consumo de resina ureia-formaldeído e/ou instalar equipamentos para controle de emissão do poluente.
PAG	Extração e beneficiamento de recursos	Consumo de eletricidade durante a prensagem à quente.	- Reduzir o tempo de aquecimento e/ou a temperatura de trabalho da prensa durante o modo de operação de iniciação e para a subunidade de aquecimento.
	Uso	Emissões de CO ₂ durante o <i>uso I</i> .	- Pela Análise de Sensibilidade nenhum dos RTQP afetaram de forma efetiva nos impactos durante o <i>uso</i> do produto. As emissões de CO ₂ estão mais relacionadas aos componentes metálicos do móvel e não ao painel de madeira.
	Pós-uso	Emissão ao ar de CH ₄ devido à disposição do produto em aterro sanitário.	- Pela Análise de Sensibilidade o requisito <i>densidade</i> do painel não deve ser superior a 0,53 g/cm ³ , assim, os impactos durante o <i>pós-uso</i> poderão ser evitados em até 7,00%.
PFFO	Manufatura	Emissão ao ar de formaldeído livre durante a prensagem à quente.	- Reduzir o consumo de resina ureia-formaldeído e/ou instalar equipamentos para controle de emissão do poluente.

Quadro 32 – Lista de *Hotspots* ambientais – estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 67 apresenta uma análise de cenários feita a partir dos resultados do Quadro 32 para a categoria de PAG. Os seguintes cenários foram traçados:

- **Cenário 1:** redução da densidade dos painéis para 0,53 g/cm³;
- **Cenário 2:** redução do tempo de aquecimento da prensa em 10%.

A partir desses cenários, a Figura 67 também apresenta um cenário combinando os resultados dos cenários 1 e 2. Além disso, o cenário de referência (3,0 MPa; 160,0°C) é apresentado assim como o cenário 4,5 MPa; 170,0°C, que se remete a situação com os maiores resultados de impactos potenciais. Assim, é possível verificar um potencial de redução de impactos para PAG em até 21,0% na etapa de extração e beneficiamentos de recursos, e até 41,0% no pós-uso, caso seja adotada a condição de manufatura pressão de 3,0 MPa e temperatura de 160,0°C – combinada com os cenários 1 e 2.

Figura 67 – Análise de cenários para redução dos *hotspots* da prensagem à quente – PAG (kg CO₂-eq.)
Fonte: elaborado pelo autor

Como última atividade da **Etapa 9**, foi realizada a proposição de indicadores de desempenho para o CVP com base nos parâmetros de processo estudados. Para isso, modelos de regressão foram delineados e testados por meio da ANOVA (ver Tabela 11).

Tabela 11 – Resultados da ANOVA dos modelos de regressão – estudo de caso 1

Fatores*	P-valor (ANOVA da Regressão)		
	PTHC	PAG	PFFOT
P	<u>0,000</u>	0,805	<u>0,007</u>
T	<u>0,003</u>	0,418	0,831
P·T	<u>0,000</u>	0,241	<u>0,020</u>
P ²	<u>0,000</u>	<u>0,006</u>	0,152
T ²	<u>0,000</u>	0,484	0,964
c ^{te}	0,008	0,421	0,961
Regressão	0,000	0,000	0,000
R ²	71,00%	86,67%	52,00%

Fonte: elaborado pelo autor

* P = Pressão; T = Temperatura

Da Tabela 11, nota-se que as variáveis independentes, o seu produto e o quadrado das mesmas afetaram de forma significativa a variável-resposta PTHC. O mesmo não ocorreu com a variável-resposta PAG, em que suas variações são explicadas em boa parte pelo apenas pelo quadrado da pressão de prensagem. Já PFFOT foi afetado pelas variações da pressão e do produto entre pressão e temperatura de prensagem. Cabe destacar que os modelos quadráticos (polinômio bidimensional) completos foram considerados significativos pela ANOVA para as três variáveis-resposta investigadas, e com valores dos coeficientes de determinação ajustado variando entre 52,00 a 86,67%.

As Equações 13 a 15 apresentam os modelos gerados.

$$PTHC = 0,06 + 0,005 \cdot P - 0,0009 \cdot T - 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot T - 0,0002 \cdot P^2 + 2,9 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (13)$$

$$PAG = -4101,06 + 42,24 \cdot P + 49,88 \cdot T - 1,1333 \cdot P \cdot T + 25,78 \cdot P^2 - 0,13 \cdot T^2 \quad (14)$$

$$PFFOT = 95,73 + 189,14 \cdot P - 5,04 \cdot T - 0,90 \cdot P \cdot T - 4,9 \cdot P^2 + 0,03 \cdot T^2 \quad (15)$$

Destaca-se que os modelos quadráticos completos gerados pelas Equações 13 a 15 podem ser tomados como forma de se determinar valores dos impactos potenciais para o ciclo de vida dos painéis aglomerados. Dentre os modelos apresentados, pode ser considerado mais preciso o modelo gerado na estimativa de PAG ($R^2 = 86,86\%$), seguido dos modelos encontrados na estimativa de PTHC ($R^2 = 71,00\%$) e de PFFOT ($R^2 = 52,00\%$).

Para a categoria PAG (rever Tabela 11), assim como comentado anteriormente, boa parte de suas variações são explicadas pelo quadrado dos valores da pressão. Para tanto, um novo modelo de regressão foi gerado na determinação dos valores da PAG, considerando-se apenas os valores do quadrado de P. A Equação 16 apresenta o modelo de regressão da PAG em função apenas da pressão P. Tal ajuste foi considerado significativo pela ANOVA (P-valor da regressão – 0,000), com coeficiente de determinação igual a 71,80%, apenas 17,00% inferior ao R^2 do modelo quadrático completo.

$$PAG = 322 + 6,55 \cdot P^2 \quad (16)$$

A solução ótima da Equação 16 consiste em assumir $P=0$ (ponto de mínimo global), e pelo domínio do problema ($3,0 \leq P \leq 4,5\text{MPa}$), como PAG cresce com valores de $P > 0$, os menores valores da função são alcançados quando $P = 3,0\text{ MPa}$, assim como esperado. Também é interessante notar a dependência de PAG dos valores de pressão P, logo, conhecendo a pressão de prensagem é possível estimar PAG para todo CVP.

De forma análoga ao que fora feito para a PAG, para a PFFOT, o modelo de regressão que contempla apenas os termos significativos pela ANOVA (P; $P \cdot T$ – rever Tabela 11) é expresso pela Equação 17. O ajuste obtido com esta equação foi considerado significativo pela ANOVA (P-valor da regressão – 0,000), com coeficiente de determinação igual a 33,22%, representando uma diferença relativa 36,00% inferior ao R^2 do modelo quadrático completo, o que reforça que a pressão P, associada ao produto da pressão pela temperatura ($P \times T$), serem os termos mais significativos no modelo completo.

$$PFFOT = 994 - 309 \cdot P + 0,209 \cdot P \cdot T \quad (17)$$

Pela natureza da Equação 17 fica evidente não haver solução ótima entre P e T para PFFOT. Quanto a categoria PTHC, como na Tabela 11 todos os termos do modelo quadrático completo foram significativos, não foi possível reduzir o modelo original a outra expressão mais simplificada.

Resultados da pós-avaliação: Etapa 10

Finalmente, como última etapa, as atividades necessárias para dar continuidade à aplicação do procedimento de GM proposto nesta tese são sumarizadas no **Plano de Continuidade** do Quadro 33. A parte superior do plano mostra os indicadores ambientais definidos na **Etapa 9** para as categorias PTHC, PAG e PFFO, bem como os valores-meta obtidos na **Etapa 7** para a condição 3 MPa e 160,0°C. Já a parte inferior do **Plano de Continuidade** mostra o cronograma hipotético definido para o processo de *geração de partículas*, classificado em segundo lugar na **Etapa 4 da pré-avaliação**.

A partir do Quadro 33, também é possível a realização de estudos de otimização do processo de prensagem à quente. Por exemplo, poderia ser um objetivo em trabalhos futuros a redução dos impactos para PAG em 25,00%. Nesse caso, utilizando a Equação 16, o novo valor de pressão P para o processo seria de 2,87 MPa. Ainda, os resultados da análise de cenários da Figura 67 da **Etapa 9**, poderiam servir de referência para a definição do valor-meta de impacto potencial para PAG.

1) ATIVIDADES PARA O PROCESSO DE MANUFATURA EM ESTUDO				
Processo de manufatura	Categorias de impacto	Indicadores ambientais		Meta
Prensagem à quente	PTHC	$PTHC = 0,06 + 0,005 \cdot P - 0,0009 \cdot T - 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot T - 0,0002 \cdot P^2 + 2,9 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$		$PTHC \leq 1,53E-03$ CTUh/UF
	PAG	$PAG = 322 + 6,55 \cdot P^2$		$PAG \leq 3,76E+02$ kg CO _{2-eq.} /UF
	PFFO	$PFFOT = 994 - 309 \cdot P + 0,209 \cdot P \cdot T$		$PFFOT \leq 1,00E+02$ kg NMVOC/UF
2) ATIVIDADES PARA O PRÓXIMO PROCESSO DE MANUFATURA A SER ESTUDADO				
Processo de manufatura	Categorias de impacto	Quando será iniciado o estudo?	Quem irá conduzir o estudo?	Prazo para finalização das atividades?
Geração de partículas	PAG	16/07/2016	Diogo A. Lopes Silva	3 meses
	PA			

Quadro 33 – Plano de Continuidade para o Estudo de Caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

Por fim, além do plano do Quadro 33, aqui também seria necessário se estabelecer um cronograma de atividades para a execução das possíveis melhorias ambientais visando minimizar os *hotspots* destacados no Quadro 32 e Figura 67 da **Etapa 9**.

4.2.2. Estudo de caso 2: indústria automotiva – manufatura de válvula de escape para motor

Resultados da pré-avaliação: Etapa 1

Situada no Estado de São Paulo, foi estudada uma fabricante de válvulas para uso em motores de veículos. Pela Figura 68 a válvula pode ser do tipo **admissão** ou **escape**, sendo que as válvulas de admissão controlam a entrada da mistura combustível/ar no cilindro do motor, enquanto que as válvulas de exaustão controlam a liberação dos gases de combustão.

Figura 68 – Visão geral da aplicação de válvulas de motor na indústria automotiva
Fonte: imagens obtidas das empresas visitadas nesta pesquisa

Em relação ao formato das válvulas, na Figura 69 são apresentadas suas principais características construtivas. As válvulas são comercializadas em função do: tipo de veículo

(veículo de passeio, caminhão, etc.), tipo de motor (marca, modelo), tipo de combustível, tipo de material (aços-liga, altas ligas, superligas), e função (admissão, escape). Assim, as dimensões D , d , L , l , e ϕ , dependem diretamente dessas características.

Figura 69 – Visão geral das características construtivas de uma válvula de motor
 Fonte: imagens obtidas das empresas visitadas nesta pesquisa

Assim, na **Etapa 1** do procedimento de *GM*, a **Matriz de Priorização de Produtos** foi utilizada para auxiliar na seleção do modelo de válvula de interesse. No Quadro 34 são apresentados os tipos de válvulas produzidas pela empresa fabricante. As válvulas foram classificadas segundo os critérios: tipo de veículo (*duas rodas, quatro rodas, e seis rodas*); tipo de motor – as marcas oficiais dos motores das montadoras de veículos não puderam ser divulgadas por questões de sigilo, logo, foram adotadas marcas fictícias (*marca 1, marca 2, marca 3, etc.*); tipo de combustível (*álcool, diesel, e gasolina*); função da válvula (*admissão e/ou escape*); e composição da válvula (*aços-liga, aços cromo-silício (S), aços austeníticos cromo-níquel-manganês (A), altas ligas, e superligas*).

Pelo Quadro 34, o produto prioritário foi a válvula de escape/exaustão feita de aço cromo-silício e superliga, utilizada em veículos de passeio (quatro rodas), e com motor de *marca 2*. Esse tipo de veículo requer oito válvulas por motor, pois há duas válvulas em cada um dos quatro cilindros do motor *marca 2*. Porém, apenas quatro válvulas são de escape.

O modelo de válvula escolhida é um dos principais produtos da empresa, correspondendo à produção de 14,0 mil válvulas por dia, e sendo principalmente exportada aos Estados Unidos. Isso explica o porquê da representatividade R , a tendência de mercado T e o custo de produção C terem sido expressivos no cálculo $R \times T \times C \times MA$.

	Lista de produtos da indústria	R	T	C	MA	R x T x C x MA	Ordem de prioridades
1.	Duas rodas, motor <i>marca 1</i> , gasolina, material S, A e altas ligas, função admissão e escape	1	5	1	1	5	7º lugar
2.	Quatro rodas, motor <i>marca 2</i> , gasolina, material S e superligas, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
3.	Quatro rodas, motor <i>marca 2</i>, gasolina, material S e superligas, função escape	5	5	5	3	375	1º lugar
4.	Quatro rodas, motor <i>marca 3</i> , gasolina, material S e A, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
5.	Quatro rodas, motor <i>marca 3</i> , gasolina/álcool, material S e A, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
6.	Quatro rodas, motor <i>marca 4</i> , gasolina/álcool, material S, A e aços-liga, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
7.	Quatro rodas, motor <i>marca 4</i> , gasolina/álcool, material A e aços-liga, função escape	3	3	3	3	81	4º lugar
8.	Quatro rodas, motor <i>marca 5</i> , gasolina, material S, A e altas ligas, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
9.	Quatro rodas, motor <i>marca 5</i> , gasolina/álcool, material S, A e altas ligas, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
10.	Quatro rodas, motor <i>marca 5</i> , gasolina, material A, função escape	1	1	3	3	9	6º lugar
11.	Quatro rodas, motor <i>marca 6</i> , gasolina, material S, A e altas ligas, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
12.	Quatro rodas, motor <i>marca 6</i> , gasolina/álcool, material S, A e altas ligas, função admissão e escape	3	3	3	3	81	4º lugar
13.	Quatro rodas, motor <i>marca 7</i> , gasolina, material S, altas ligas e superligas, admissão e escape	5	3	5	3	225	2º lugar
14.	Seis rodas, motor <i>marca 8</i> , diesel, material S, A e superligas, função admissão e escape	3	1	5	3	45	5º lugar
15.	Seis rodas, motor <i>marca 9</i> , diesel, material S, A e altas ligas, função admissão e escape	3	3	5	3	135	3º lugar

Quadro 34 – Resultado da matriz para seleção do produto de interesse para o estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

O próximo passo foi estabelecer a UF e o FR do estudo, conforme o Quadro 35. Então, foi definido também do sistema de produto da Figura 70.

Produto	Função	Unidade funcional	Fluxo de referência
Válvula de escape para uso em motores de veículos de passeio movidos à gasolina	Assegurar que a câmara de combustão esteja selada durante a ignição, e controlar a liberação dos gases de combustão.	A vedação da câmara de combustão e o controle da emissão dos gases de combustão pelo percurso de 300.000 km, utilizando veículo de passeio com motor de <i>marca 2</i> , movido à gasolina.	A produção de quatro válvulas feitas de aço cromo-silício e superliga.

Quadro 35 – Produto, função, UF e FR do estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 70 – Sistema de produto para o estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

O sistema de produto da Figura 70 apresenta quatro etapas de CVP. Recursos como rebolo de corte, fluido de usinagem, ligas metálicas, e eletricidade, são os principais fluxos de entrada para a manufatura das válvulas. A fase de uso foi dividida em *uso 1* (uso das válvulas na montagem do motor), e *uso 2* (uso do motor de *marca 2* pelo consumidor final). Já a Figura 71 apresenta o DFP da etapa de manufatura das válvulas.

Nesse fluxograma, foram definidas as matérias primas que constituem as válvulas, sendo que o aço cromo-silício foi o **Silchrome 1**, enquanto que a superliga foi o **Inconel 751**. O Silchrome 1 é empregado na manufatura da cabeça das válvulas, enquanto o Inconel 751 compõe a haste das mesmas. Os demais fluxos de materiais e de energia que entram e que saem do processo de fabricação também são apresentados na Figura 71.

Figura 71 – Diagrama de fluxo de processo da etapa de manufatura – estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

Maiores detalhes sobre os fluxos de entrada e de saída do DFP da Figura 71 serão discutidos na **Etapa 2** da aplicação do procedimento de *GM*. Contudo, é importante ressaltar que os processos elementares deste diagrama estão agregados em subsistemas, e assim, a

seguir cada processo será detalhado em termos das operações de manufatura que o integram. Já durante a **Etapa 5**, será abordada a desagregação das operações daquele processo de maior interesse para realização da macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**.

Processamento de tarugos

Pela Figura 72, o processamento dos tarugos pode ser dividido em três principais operações: **corte**, **extrusão** e **cunhagem**. O processo de corte tem a finalidade de cortar as barras metálicas de 3,0-6,0 m de comprimento em peças menores denominadas tarugos. As barras são utilizadas como matéria prima na produção das válvulas, e elas podem ser feitas de diferentes tipos de materiais como aços-liga, altas ligas e superligas. O corte de tarugos é uma operação por cisalhamento e que ocorre a temperaturas de 300,0-900,0°C, dependendo do tipo de material que a barra é feita. Em seguida, os tarugos são extrudados e cunhados utilizando para isso uma operação de forjamento. No forjamento, os tarugos são postos num molde/matriz, onde ocorre sua conformação mecânica. A extrusão realiza a conformação da haste da válvula enquanto que a cunhagem realiza a conformação da cabeça da válvula.

Figura 72 – Operações de manufatura agregadas no *processamento de tarugos*

Fonte: imagens obtidas das empresas visitadas nesta pesquisa

Outras operações de manufatura que também ocorrem aqui envolvem os tratamentos térmicos do material (solubilização, envelhecimento) e a limpeza/lavagem da válvula.

Processamento da haste

Na Figura 73 são sumarizadas as principais operações de manufatura aplicadas no processamento da haste. Após a extrusão e cunhagem, é necessário endireitar a haste da válvula para garantir seu paralelismo. Feito isso, como o produto escolhido no estudo trata-se de uma válvula bi-metálica, uma parte de sua haste é cortada, e em seguida, a parte

remanescente é soldada por atrito com a haste feita do outro material. Após a soldagem, uma usinagem de rebarba de solda é realizada para a retirada do excesso de material na haste. Já o ajuste do comprimento total da haste é feito utilizando uma serra com disco abrasivo. E por fim, a retificação *centerless* da haste é realizada utilizando rebolo feito de óxido de alumínio. Todas essas operações de usinagem utilizam óleo mineral como fluido de corte.

Figura 73 – Operações de manufatura agregadas no *processamento da haste da válvula*
 Fonte: imagens obtidas das empresas visitadas nesta pesquisa

Outras operações de manufatura importantes não contempladas pela Figura 73 são o revestimento da haste com uma solução a base de cromo e aditivos (desengraxante, decapante alcalino), e os tratamentos térmicos da haste, com destaque para a têmpera.

Processamento da cabeça

As principais operações realizadas incluem o **torneamento de recesso, revestimento da sede, retificação da sede, retificação de pescoço e chanfros** (ver Figura 74).

O torneamento de recesso tem a função de definir a sede da válvula. Em seguida, a operação de revestimento de sede visa à aplicação de um pó químico de revestimento via soldagem por plasma na região de sede da válvula. Esse material tem a função de auxiliar na vedação da válvula quando ela estiver operando no motor do automóvel. Outras operações realizadas são a retificação da sede, retificação de pescoço e retificação dos chanfros/canais. Todas essas operações de retificação são feitas utilizando rebolos de corte de óxido de alumínio ou de CBN (nitreto cúbico de boro), e óleo mineral como fluido de corte.

Figura 74 – Operações de manufatura agregadas no *processamento da cabeça da válvula*
 Fonte: imagens obtidas das empresas visitadas nesta pesquisa

Acabamento e embalagem

A linha de acabamento e embalagem envolve operações de limpeza das válvulas, polimento da haste e formação dos pacotes de válvulas para expedição (ver Figura 75).

Figura 75 – Operações de manufatura agregadas no processo de *acabamento e embalagem*
 Fonte: imagens obtidas das empresas visitadas nesta pesquisa

Resultados da pré-avaliação: Etapa 2

Os dados de ICV para a **Etapa 2** foram obtidos de fontes primárias e secundárias, sendo que os fluxos diretos de inventário estão apresentados na Tabela 12, para o FR de

quatro unidades de válvulas. Os principais aspectos ambientais inventariados durante a manufatura foram o consumo de eletricidade, fluido de corte, e rebolo de corte.

Tabela 12 – Resultados do ICV para o estudo de caso 2

	Entradas		Saídas	
Manufatura	▪ Diesel*	2,0 g	▪ Dióxido de carbono*	6,4 g
			▪ Monóxido de carbono*	1,3E-05 g
	<i>Processamento de tarugos</i>			
	▪ Energia elétrica	2.311,6 J	▪ Cavaco de Inconel 751	11,6 g
	▪ Inconel 751	155,6 g	▪ Cavaco do rebolo	0,8 g
	▪ Lubrificante	1,2 ml	▪ Lubrificante usado	1,2 ml
	▪ Rebolo de óxido de alumínio	0,8 g		
	<i>Processamento da haste das válvulas</i>			
	▪ Energia elétrica	22.289,2 J	▪ Cavaco de Inconel 751	7,6 g
	▪ Lubrificante	114,8 ml		
	▪ Silchrome 1	46,4 g	▪ Cavaco de Silchrome 1	8,0 g
	▪ Água	800,0 ml		
	▪ Cromo	2,0 ml	▪ Cavaco do rebolo	5,2 g
	▪ Desengraxante	0,8 ml		
	▪ Decapante alcalino	1,6 ml	▪ Efluente líquido	918,0 ml
	▪ Rebolo de óxido de alumínio	5,2 g		
Uso	<i>Processamento da cabeça das válvulas</i>			
	▪ Energia elétrica	16.720,8 J	▪ Cavaco de Inconel 751	25,4 g
	▪ Lubrificante	86,8 ml	▪ Cavaco de Silchrome 1	2,2 g
	▪ Pó químico de revestimento	17,2 g	▪ Cavaco dos rebolos	13,6 g
	▪ Rebolo de CBN	0,01 g	▪ Resíduo do pó de revestimento	3,2 g
	▪ Rebolo de óxido de alumínio	13,6 g	▪ Lubrificante usado	86,8 ml
	<i>Acabamento e embalagem</i>			
	▪ Energia elétrica	1.003,2 J		
	▪ Lubrificante	2,8 ml	▪ Lubrificante usado	2,8 ml
	▪ Papelão	15,2 g		
	<i>Uso 1: uso do válvula na montagem do motor</i>			
	▪ Válvulas de escape	176,4 g	▪ Dióxido de carbono*	23,2 g
	▪ Diesel*	1,4 g	▪ Monóxido de carbono*	0,07 g
	▪ Óleo pesado*	6,0 g	▪ Resíduo sólido papelão	15,2 g
	<i>Uso 2: uso do válvula de veículo</i>			
Pós-uso	▪ Diesel*	0,14 g	▪ Dióxido de carbono*	0,40 g
			▪ Dióxido de carbono**	5,4E+04 kg
			▪ Monóxido de carbono*	9,0E-04 g
	▪ Gasolina**	1,7E+04 kg	▪ Dióxido de enxofre**	2,5 kg
			▪ Válvulas usadas	161,2 g
	<i>Disposição em aterro</i>			
	▪ Diesel*	0,31 g	▪ Dióxido de carbono*	0,8 g
Pós-uso	▪ Válvulas usadas	161,2 g	▪ Monóxido de carbono*	2,0E-03 g
			▪ Válvulas usadas	161,2 g

* Emissões de CO₂ e CO devido ao consumo de diesel e óleo pesado em atividades de transporte;

** Emissões de CO₂ e SO₂ diretamente relacionados ao consumo de gasolina.

Para a quantificação dos fluxos indiretos de inventário foram utilizados o banco de dados do software GaBi 6.5 e dados da literatura (ver Quadro 36). Foi assumido o critério de corte mássico de 95,0% de todos os fluxos de entrada diretos do sistema de produto.

Descrição	Fontes de dados	Nação de origem
Cadeia de extração e fornecimento de água potável	PE International (2015m)	Europa
Cadeia de produção do aço, ferro fundido, manganês, silício, enxofre, e alumínio (materiais de base que compõe as ligas metálicas de Inconel 751 e Silchrome 1)	PE International (2015b,c,d,k,n,q)	Brasil / Europa
Cadeia de produção do diesel combustível	PE International (2015a)	Brasil
Cadeia de produção da energia elétrica	PE International (2015f)	Brasil
Cadeia de produção da gasolina	PE International (2015g)	Brasil
Cadeia de produção do papelão	PE International (2015j)	Europa
Cadeia de produção do óleo pesado combustível	PE International (2015h)	Brasil
Cadeia de produção do rebolo de óxido de alumínio	Filleti (2015)	Europa
Cadeia de produção do rebolo de CBN	Filleti (2015)	Europa

Quadro 36 – Fontes de dados para os fluxos indiretos de inventário – estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 36, nota-se que os fluxos indiretos de inventário foram obtidos levando-se em conta as realidades brasileira e europeia. Os dados referentes à realidade geopolítica europeia foram adotados neste estudo devido à indisponibilidade das respectivas informações para o caso do Brasil. Ademais, os fluxos indiretos devido à construção do maquinário industrial utilizado na manufatura das válvulas não foram incluídos na **pré-avaliação**, porém, durante a macroetapa de **avaliação e monitoramento** essas informações foram levantadas com foco somente naquele processo de maior interesse.

Em relação à etapa de manufatura das válvulas, o inventário da Tabela 12 foi construído para as seguintes considerações:

- O consumo de eletricidade em cada processo elementar foi calculado com base na potência nominal e no tempo de operação das máquinas utilizadas pela indústria produtora de válvulas. Tais informações foram levantadas durante as visitas técnicas feitas na empresa;
- A quantificação da geração de efluente líquido está associada ao consumo de lubrificantes, água e aditivos provenientes da operação de cromação da válvula;
- Sobre os rebolos de óxido de alumínio e de CBN, os dados de suas cadeias produtivas foram retiradas de Filleti (2015), o qual incluiu a energia total necessária para a produção

dos mesmos. Sobre o consumo de lubrificantes (fluido de usinagem e óleos), foi assumido o óleo mineral na proporção de 0,8% em relação à quantidade de água presente no fluido;

- A entrada de 155,6 g de Inconel 751 ocorre no processo elementar *processamento de tarugos*, enquanto que a entrada de 46,4 g de Silchrome 1 ocorre no *processamento da haste*. Contudo, para efeito do cálculo dos impactos potenciais na **Etapa 3**, o consumo total de Inconel 751 foi dividido proporcionalmente entre os quatro processos elementares da Figura 71, em função da quantidade de resíduos sólidos gerados com o processamento do material. Afinal, caso isso não fosse feito, todos os impactos da cadeia de produção do Inconel 751 seriam atribuídos somente ao *processamento do tarugo*, superestimando assim seus impactos potenciais. Do mesmo modo, o consumo total de Silchrome 1 também foi rateado proporcionalmente em função da quantidade de resíduos sólidos gerados pelo *processamento da haste*, *processamento da cabeça*, e o *acabamento e embalagem*;
- Para a modelagem do transporte de insumos e de matérias primas, no banco de dados do GaBi escolheu-se o processo “GLO: Truck PE”, Euro 3, com carga padrão de 12,0 t, para representar a maioria dos processos de transporte rodoviário existentes no sistema de produto. Desse modo, foi adicionado no inventário o consumo total de 2,0 g de diesel por UF, e as distâncias de transporte são apresentadas no Quadro 37.

Descrição da matéria prima/insumo	Origem (Estado)	Distância de transporte até a fábrica de válvulas (km)
Cromo	São Paulo	12,0
Decapante alcalino	São Paulo	12,0
Desengraxante	São Paulo	12,0
Diesel	São Paulo	60,0
Inconel 751	São Paulo	150,0
Lubrificantes	Rio de Janeiro	450,0
Óleo pesado combustível	São Paulo	60,0
Papelão	São Paulo	10,0
Pó químico de revestimento	Alemanha (importação)	10.126,0
	Rio de Janeiro	450,0
Silchrome 1	São Paulo	150,0

Quadro 37 – Distâncias de transporte para as matérias primas e insumos – estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

Em relação à fase de uso das válvulas de escape, foram realizadas as seguintes considerações para o ICV da Tabela 12:

- De acordo com os dados primários, no *uso 1* foram assumidas as distâncias de 450,0 km para a distribuição terrestre do produto até o porto, e 10.000,0 km para a exportação do

mesmo por navio até os Estados Unidos (país onde está localizada a montadora de motores de veículos *marca 2*). Durante a modelagem do *uso 1* no software GaBi, foi escolhido o processo “GLO: Truck ELCD/PE-GaBi”, Euro 3, e carga de 12,0 t para representar a distribuição do produto até o porto; e o processo “GLO: Container ship ELCD/PE-GaBi” para representar a atividade de exportação marítima do produto até os Estados Unidos. Assim, o consumo total de diesel por UF para o transporte terrestre foi de 1,4 g, enquanto que o consumo de óleo pesado foi de 6,0 g por UF para o transporte marítimo;

- No *uso 1* são gerados 15,2 g de resíduos de papelão associados a embalagem das válvulas produzidas e transportadas até montadora de motores nos Estados Unidos. Os aspectos ambientais devido à inspeção, preparo e montagem das válvulas no motor de veículo *marca 2* não foram contabilizados, por serem considerados desprezíveis. Também não foram incluídos os dados de inventário da montagem completa do automóvel *marca 2* – chassis, sistema de transmissão, pneus, etc.;
- Após ter sido produzido o veículo *marca 2*, assumiu-se a distribuição do mesmo por 100,0 km até o consumidor final. Para isso, foi utilizado o processo “GLO: Truck ELCD/PE-GaBi”, Euro 3, e carga de 12,0 t do software GaBi;
- Para o *uso 2*, foi considerado o processo “DE: consumption automotive part PE” do GaBi 6.5 para estimar as emissões de CO₂ e SO₂ devido ao consumo de gasolina (densidade 0,734 kg/l) no motor de veículo *marca 2*. As emissões foram estimadas para a vida útil de 300.000,0 km das válvulas, sendo que 60,0% do percurso ocorreria em trecho urbano, e com o veículo sujeito ao rendimento médio de 13,0 km/l. Desse modo, o consumo total de gasolina do veículo *marca 2* foi de 1,7E+04 kg para a vida útil de 300.000,0 km rodados.

Em relação a etapa de pós-uso do produto, assumiu-se para o ICV da Tabela 12 que:

- Após o término da vida útil das válvulas automotivas, elas seriam descartadas em aterro sanitário a 100,0 km de distância do consumidor final. Segundo a montadora de veículos, a reciclagem do motor em fornos de siderurgia trata-se também de outro cenário recorrente, mas que devida à falta de informações disponíveis não foi incluída neste estudo;
- Para a modelagem da atividade de destinação das válvulas foi utilizado o software GaBi, e escolhido o processo “GLO: Truck PE”, Euro 3, e carga de 12,0 t, para a distância de 100,0 km. Assim, o consumo total de diesel no transporte modelado foi de 0,31 g por UF.

Resultados da pré-avaliação: Etapa 3

Com base no ICV obtido, foi então realizada a **Etapa 3** do procedimento de *GM*. Foi escolhido o método ILCD/PEF recommendation v. 1.06 (EC/JRC/IES, 2010b) e suas treze

categorias de impacto para a AICV da **pré-avaliação**, e os resultados foram normalizados conforme os fatores de normalização “*PEF Pilot, incl biogenic carbon [Person equivalent]*”, disponíveis no software GaBi 6.5. A Figura 76 apresenta os resultados normalizados por etapa do ciclo de vida das válvulas de exaustão.

Figura 76 – Resultados do AICV para o estudo de caso 2
Fonte: elaborado pelo autor

Os resultados da Figura 76 apontam que 79,6% dos impactos no CVP ocorreram nas categorias PAG, PTHNC, PTHC, e PFMP. Para todas as categorias avaliadas, os impactos se mostraram fundamentalmente relacionados ao *uso 2* do produto. Os principais *hotspots* do *uso 2* para PAG, PTHNC, PTHC e PFMP foram as emissões ao ar de **CO**, **CO₂**, **SO₂**, **material particulado**, e **metais pesados**, e as emissões a água de **metais pesados**, todos oriundos da cadeia de produção da gasolina e/ou de sua queima no motor de veículo *marca 2*. Os impactos do *uso 2* foram expressivos por conta da grande demanda de gasolina (1,7E+04 kg) no sistema, uma vez que vida útil das válvulas foi de 300.000 km rodados.

Em relação à etapa de manufatura das válvulas automotivas, ainda que seus impactos relativamente ao CVP não tenham sido expressivos, na Figura 77 são apresentados os impactos potenciais para cada um de seus processos elementares. Isso foi feito para servir de referência durante a classificação dos processos em Tipo I, II ou III na **Etapa 4**.

A Figura 77 destaca que os processos elementares com maior contribuição nos impactos foram o *processamento da cabeça*, *processamento de tarugos*, e o *processamento da haste* das válvulas. Os *hotspots* ambientais para esses três processos foram principalmente o **consumo de eletricidade** para a categoria PDRA, seguido do consumo das

matérias primas **Inconel 751** e **Silchrome 1**, e o **consumo de fluido de corte**. Esses impactos da etapa de manufatura foram indiretos, pois estiveram relacionados às cadeias de produção das matérias primas e insumos empregados na fabricação das válvulas. As emissões diretas geradas na manufatura (e.g., lubrificantes usados, resíduos sólidos) não contribuíram significativamente para os impactos potenciais avaliados.

Figura 77 – Resultados da AICV por processo elementar da etapa de manufatura das válvulas automotivas
Fonte: elaborado pelo autor

Resultados da pré-avaliação: Etapa 4

De posse dos resultados da AICV, a **Etapa 4** foi conduzida. Como destacado anteriormente nas Figura 76 e 77, nenhum dos processos de manufatura analisados apresentou impactos potenciais superiores a 5,0% no CVP, logo, não puderam ser enquadrados nas situações de referência A ou B. Porém, na seção D.2 do **Apêndice D** são apresentados resultados que mostram que o *processamento da haste* e *processamento da cabeça* foram classificados dentro da situação de referência C.

Pela discussão da seção D.2 do **Apêndice D**, os RTQP: *circularidade (haste e sede)*, *diâmetro da haste*, *rugosidade (haste e sede)*, e *dureza (cabeça, haste e topo)* podem afetar os impactos ambientais a jusante da manufatura, com destaque para o *uso 2* do produto. Essas propriedades das válvulas são determinadas principalmente durante as operações de *processamento da haste* e no *processamento da cabeça* das válvulas.

Tendo finalizada a classificação dos processos, os resultados da **Etapa 4** foram sumarizados na **Matriz de Priorização de Processos**, conforme o Quadro 38.

Processo elementar da etapa de manufatura	Categorias de impacto ambiental de destaque	Aspectos ambientais de destaque	Tipo de processo (I, II, III)	Ordem de prioridade
Processamento da haste	PAG	- Emissão ao ar de CO ₂ devido à produção e consumo de gasolina na etapa de uso do produto.	Tipo III	1º
	PDRA	- Consumo de eletricidade e de fluido de corte na manufatura		
	PFMP	- Emissão ao ar de CO e de materiais particulados devido à produção de gasolina utilizada na etapa de uso.		
	PTHC	- Emissão ao ar de metais pesados devido à produção da gasolina utilizada na etapa de uso.		
	PTHNC	- Emissão ao ar de metais pesados devido à produção da gasolina utilizada na etapa de uso.		
Processamento da cabeça	PAG	- Emissão ao ar de CO ₂ devido à produção e consumo de gasolina na etapa de uso.	Tipo III	1º
	PDRA	- Consumo de eletricidade e de fluido de corte na manufatura		
	PFMP	- Emissão ao ar de CO e de materiais particulados devido à produção de gasolina utilizada na etapa de uso do produto.		
	PTHC	- Emissão ao ar de metais pesados devido à produção da gasolina utilizada na etapa de uso.		
	PTHNC	- Emissão ao ar de metais pesados devido à produção da gasolina utilizada na etapa de uso.		
Processamento de tarugos	-	-	-	Descartado
Acabamento e embalagem	-	-	-	Descartado

Quadro 38 – Matriz de priorização de processos para o estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

Com base nos resultados da **Etapa 3**, como os impactos devido aos processos de fabricação das válvulas representaram menos de 1,0% dos impactos no CVP, optou-se pela escolha somente da categoria PDRA para inclusão na matriz do Quadro 38, pois esta foi a principal categoria afetada pela etapa de manufatura das válvulas. Enquanto isso, maior foco foi dado às categorias de destaque no *uso 2* das válvulas, afinal, 99,0% dos impactos no CVP ocorreram nesta etapa. Assim, as categorias PAG, PTHC, PTHNC, e PFMP foram

também incluídas no Quadro 38, sob o intuito de possibilitar um estudo mais detalhado sobre a influência dos processos de fabricação sobre os impactos a jusante da manufatura.

Desse modo, o *processamento da haste* e o *processamento da cabeça* foram os processos prioritários na matriz do Quadro 38. Contudo, para efeito de realização da macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**, nesta tese, optou-se por estudar somente o *processamento da haste* das válvulas.

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 5

Para o delineamento experimental da **Etapa 5**, o processo de manufatura selecionado na **pré-avaliação** foi inicialmente redefinido em termos dos seus limites de fronteira, pois o *processamento da haste* estava agregado conforme o esquema da Figura 73.

Assim, com base nos resultados das entrevistas realizadas junto à produtora de válvulas, foi determinada que a *retificação da haste* seria aquela atividade mais relevante entre as demais operações de manufatura agregadas. Segundo o(s) entrevistado(s), a *retificação da haste* é a operação onde ocorre mais de 25,0% do consumo total de eletricidade, e aproximadamente 30,0% do consumo total de fluido de corte relativamente às demais operações na haste. Além disso, é durante a retificação da haste que são determinadas algumas das principais propriedades físico-mecânicas das válvulas, como: *diâmetro da haste*, *circularidade da haste*, *rugosidade da haste* e *dureza da haste*.

Para o processo de retificação da haste, um estudo experimental foi executado na retificadora *centerless* situada no LAPRAS-NUMA-EESC-USP (detalhes na seção 3.2.3). Os aspectos ambientais, modos de operação e subunidades monitoradas na máquina constam na Figura 78. Os modos de operação foram os **modos não produtivos A** (iniciação), **D** (espera), **E** (desligamento), e **F** (dressagem) e o **modo produtivo C** (retificação).

Pela Figura 78 o consumo de eletricidade e o consumo de fluido de corte ilustram os fluxos a serem monitorados no processo de retificação. Assim, os esses fluxos de entrada foram classificados na **Matriz de Relacionamentos** do Quadro 39.

Figura 78 – Limites de fronteira do processo de retificação *centerless*
 Fonte: elaborado pelo autor

Aspectos ambientais	Subunidade	Modos de operação				
		A	C	D	E	F
Consumo de eletricidade	Primária	X	X	X	X	X
	Hidráulica	X	X	X	X	X
	Dressador do rebolo de corte				X	
	Dressador do rebolo de arraste				X	
	Rebolo de corte	X	X	X	X	X
	Rebolo de arraste	X	X	X	X	X
	Lubrificação	X	X	X	X	X
Consumo de fluido de corte	Primária					
	Hidráulica					
	Dressador do rebolo de corte					
	Dressador do rebolo de arraste					
	Rebolo de corte					
	Rebolo de arraste					
	Lubrificação	X	X	X	X	X

Quadro 39 – Matriz de relacionamentos para o estudo de caso 2: aspectos ambientais, subunidades e modos de operação

Fonte: elaborado pelo autor

Já para os fluxos indiretos, foram utilizadas as mesmas fontes de dados do Quadro 36 da **Etapa 2**, e também foram incluídos os fluxos devido à construção do maquinário utilizado no processo de retificação, conforme o **Diagrama de Relações** da Figura 79.

Pelo diagrama da Figura 79, foram incluídos na modelagem 209,0 kg do peso total da retificadora, sendo que os seus componentes e materiais foram extraídos a partir do banco de dados do software GaBi 6.5 (detalhes no Quadro 40). Partes estruturais e outros componentes da máquina (motor elétrico, etc.) não foram incluídos na modelagem pela falta de informações disponíveis no banco de dados.

O fator f foi então calculado com base nas **Equações 10 e 11** para adaptação dos fluxos indiretos dos componentes e materiais selecionados na Figura 79. O valor calculado de f foi 2,15E-07, tendo sido assumido 8h/dia de funcionamento da máquina, tempo médio de 4s para a produção de uma válvula, tempo de espera de 30s, tempo de iniciação da máquina 720s, e vida útil projetada de 30 anos para a prensa.

Com base nos resultados das entrevistas utilizando o questionário do **Apêndice E**, foram definidos as condições experimentais (CEx) do Quadro 41 para o estudo.

Figura 79 – Diagrama de relações dos materiais e componentes utilizados na construção da retificadora
Fonte: elaborado pelo autor

Descrição	Fontes de dados	Nação de origem
Cadeia de extração e fornecimento de água potável	PE International (2015m)	Europa
Cadeia de produção do aço	PE International (2015c)	Global
Cadeia de produção da bomba hidráulica (800 W, para uso industrial)	PE International (2015e)	Global
Cadeia de produção do óleo hidráulico (tipo não especificado)	PE International (2015l)	Europa
Cadeia de produção do óleo mineral (base para o fluido de corte)	Clarens (2008)	Europa
Cadeia de produção do rebolo de óxido de alumínio	Filleti (2015)	Europa

Quadro 40 – Fonte de dados para os fluxos indiretos dos materiais e componentes utilizados na construção da retificadora *centerless*
Fonte: elaborado pelo autor

Fatores de entrada		Níveis experimentais		
Parâmetros (Definidos no Quadro 10 da seção 3.2.3)	Unidade	Valor mínimo	...	Valor máximo
Número de passes na dressagem	-	2	4	6
Vazão de fluido de corte	l/min	18,0	25,0	36,0
Velocidade de corte na dressagem	cm/s	0,3	0,8	1,6

CEx	Composição entre os fatores
1	Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
2	Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
3	Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
4	Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
5	Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
6	Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
7	Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
8	Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
9	Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
10	Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
11	Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
12	Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
13	Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
14	Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
15	Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
16	Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
17	Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
18	Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
19	Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
20	Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
21	Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
22	Nº passes = 4; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
23	Nº passes = 4; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
24	Nº passes = 4; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s
25	Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s
26	Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s
27	Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s

Quadro 41 – Condições experimentais estabelecidas para o monitoramento ambiental do processo de retificação *centerless* – estudo de caso 2
Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 41 foram estabelecidas 27 CEx, e o número de repetições para cada experimento foi igual a 4. Assim, a **Matriz de Monitoramento Ambiental do Processo** de retificação foi aplicada para um total de 108 tratamentos delineados, e os resultados são

apresentados nos parágrafos que seguem. Ao término de cada tratamento, foram determinados os requisitos técnicos de qualidade da haste de cada válvula usinada (*circularidade da haste, diâmetro final da haste, e rugosidade da haste*).

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 6

O monitoramento do processo de retificação foi conduzido aplicando-se as **Equações 3b** e **4b** para os aspectos ambientais do Quadro 39 da **Etapa 5**. Assim, a **Matriz de Monitoramento Ambiental do Processo** é apresentada na seção F.2 do **Apêndice F**. Os aspectos ambientais foram inventariados para a usinagem de uma válvula, e posteriormente padronizados para o FR da produção de quatro válvulas de escape (peso total de 176,4 g).

Conforme a seção F.2 do **Apêndice F**, o consumo de eletricidade no processo variou de 1.140,67 a 1.834,97 KJ, enquanto que o consumo de fluido de corte variou de 4,80 a 9,60 litros. Na Figura 80, é apresentado um gráfico do monitoramento de potência do processo em função do tempo de experimento para a condição: nº de passes na dressagem = 4; vazão de fluido = 25,0 l/min; e velocidade de dressagem = 1,6 cm/s. São destacadas as subunidades ativas em cada modo de operação da máquina, sendo: P – primário, H – hidráulico, RA – rebolo de arraste, RC – rebolo de corte, F – fluido de corte, e DRC – dressador do rebolo de corte. Outras curvas similares também foram encontradas para os demais 26 tratamentos estudados.

Os resultados da Figura 80 mostram que o menor consumo de energia ocorreu para a subunidade P nos modos de operação de iniciação e desligamento. Os perfis de consumo de potência nos modos de iniciação e desligamento foram análogos, porém, no modo de desligamento o tempo de experimento foi menor (150,00 s) do que na iniciação (720,00 s), e assim, o consumo total de energia na iniciação foi superior. No modo de iniciação, o maior consumo de energia se deve a subunidade de lubrificação/fluido de corte, pois quando ela está ativada são necessários 10,00 min para que o sistema aqueça o fluido de corte antes de sua utilização na retificação das válvulas. O pico de potência consumida no processo (5,70 KW) ocorreu para o modo de retificação, contudo, o consumo de eletricidade associado (66,00 KJ) a usinagem das quatro válvulas foi inferior ao consumo total nos modos de dressagem (91,58 KJ) e de espera (340,00 KJ). Pelos resultados da seção F.2 do **Apêndice F**, em geral, o maior consumo de energia ocorreu para o modo de espera, seguido da dressagem, e do modo de retificação.

Figura 80 – Mapeamento da potência consumida em função do tempo de experimento – processo de retificação *centerless*, 4 passes, 25,0 l/min, 1,6 cm/s
Fonte: elaborado pelo autor

Sobre os RTQP, os resultados da seção F.2 do **Apêndice F** mostraram que a *rugosidade Ra da haste* variou de 0,20 a 1,44 μm , o *diâmetro final da haste* variou de 5,07 a 6,38 mm, e a *circularidade RONt da haste* foi de 8,08 a 19,00 μm . A partir disso, esses requisitos foram correlacionados junto aos aspectos ambientais a jusante da manufatura das válvulas, conforme detalhamento na seção G.2 do **Apêndice G**, e os resultados mostraram que apenas o *uso 2* do produto foi afetado pelos requisitos.

O *uso 2* foi afetado com base nas variações nos consumos de gasolina, sendo que o valor de referência para 300.000,00 km rodados foi de 17.000,00 kg de gasolina. Assim, o consumo de gasolina na fase de uso das 4 válvulas de escape variou de 17.000,00 a 17.510,00 kg para o motor de veículo estudado. O consumo de válvulas também foi afetado na etapa de *uso 2*, variando de 4 a 4,4 válvulas por motor, em função da vida útil projetada as peças usinadas.

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 7

Uma vez finalizado o monitoramento ambiental do processo de retificação, os resultados de ICV foram transformados em impactos potenciais. Para isso, foi utilizado o método de ILCD/PEF recommendation v1.06 durante a AICV. Aqui, foram apenas

avaliadas as categorias destacadas na **Etapa 4**, i.e., **PAG**, **PTHC**, **PTHNC**, e **PFMP**. Os resultados dos impactos para o CVP são sumarizados na Tabela 13 por tratamento.

Tabela 13 – Resultados da AICV por tratamento – estudo de caso 2

Tratamentos	Estatística	PAG (kg CO ₂ -eq.)	PDRA (kg Sb- eq.)	PFMP (kg PM2,5- eq.)	PTHC (CTUh)	PTHNC (CTUh)
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	$\bar{x}$	1,66E+05	3,01E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
	s	1,43E+03	2,59E-04	9,65E-01	1,70E-05	9,03E-05
	Máx	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	$\bar{x}$	1,68E+05	3,03E-02	1,13E+02	2,00E-03	1,06E-02
	s	1,65E+03	2,99E-04	1,11E+00	1,97E-05	1,04E-04
	Máx	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	$\bar{x}$	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
	s	7,45E-02	4,86E-09	2,43E-05	2,98E-10	8,72E-10
	Máx	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
	Min	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	$\bar{x}$	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,97E-03	1,05E-02
	s	4,77E+02	8,63E-05	3,22E-01	5,68E-06	3,01E-05
	Máx	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	$\bar{x}$	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
	s	4,13E+02	7,49E-05	2,79E-01	4,91E-06	2,60E-05
	Máx	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	$\bar{x}$	1,68E+05	3,04E-02	1,13E+02	2,00E-03	1,06E-02
	s	1,24E+03	2,24E-04	8,36E-01	1,48E-05	7,82E-05
	Máx	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
	Min	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	$\bar{x}$	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
	s	2,19E-03	2,10E-07	1,20E-04	1,20E-09	5,35E-09
	Máx	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	$\bar{x}$	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
	s	4,29E-02	1,79E-07	2,30E-05	1,23E-09	7,18E-10
	Máx	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	$\bar{x}$	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
	s	1,24E+03	2,24E-04	8,36E-01	1,48E-05	7,82E-05
	Máx	1,68E+05	3,03E-02	1,13E+02	2,00E-03	1,06E-02
	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02

Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,66E+05 4,13E+02 1,66E+05 1,65E+05	3,00E-02 7,48E-05 3,00E-02 2,99E-02	1,12E+02 2,79E-01 1,12E+02 1,11E+02	1,98E-03 4,92E-06 1,98E-03 1,97E-03	1,05E-02 2,61E-05 1,05E-02 1,04E-02
Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,66E+05 4,13E+02 1,66E+05 1,65E+05	3,00E-02 7,47E-05 3,00E-02 2,99E-02	1,12E+02 2,79E-01 1,12E+02 1,11E+02	1,98E-03 4,92E-06 1,98E-03 1,97E-03	1,05E-02 2,61E-05 1,05E-02 1,04E-02
Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,68E+05 5,96E-02 1,68E+05 1,68E+05	3,05E-02 2,41E-07 3,05E-02 3,05E-02	1,14E+02 6,37E-06 1,14E+02 1,14E+02	2,01E-03 7,76E-10 2,01E-03 2,01E-03	1,06E-02 2,42E-09 1,06E-02 1,06E-02
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,65E+05 7,81E-02 1,65E+05 1,65E+05	2,99E-02 8,97E-08 2,99E-02 2,99E-02	1,11E+02 1,82E-05 1,11E+02 1,11E+02	1,97E-03 5,24E-09 1,97E-03 1,97E-03	1,04E-02 7,83E-10 1,04E-02 1,04E-02
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,65E+05 9,30E-02 1,65E+05 1,65E+05	2,99E-02 2,03E-07 2,99E-02 2,99E-02	1,11E+02 5,35E-05 1,11E+02 1,11E+02	1,97E-03 7,83E-10 1,97E-03 1,97E-03	1,04E-02 7,69E-11 1,04E-02 1,04E-02
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,66E+05 1,24E+03 1,68E+05 1,65E+05	3,00E-02 2,24E-04 3,03E-02 2,99E-02	1,12E+02 8,36E-01 1,13E+02 1,11E+02	1,98E-03 1,48E-05 2,00E-03 1,97E-03	1,05E-02 7,82E-05 1,06E-02 1,04E-02
Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,65E+05 1,53E-01 1,65E+05 1,65E+05	2,99E-02 6,28E-08 2,99E-02 2,99E-02	1,11E+02 2,94E-05 1,11E+02 1,11E+02	1,97E-03 8,35E-10 1,97E-03 1,97E-03	1,04E-02 1,23E-09 1,04E-02 1,04E-02
Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,65E+05 7,16E-02 1,65E+05 1,65E+05	2,99E-02 1,04E-07 2,99E-02 2,99E-02	1,11E+02 5,68E-06 1,11E+02 1,11E+02	1,97E-03 7,95E-10 1,97E-03 1,97E-03	1,04E-02 3,84E-09 1,04E-02 1,04E-02
Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,65E+05 5,31E-02 1,65E+05 1,65E+05	2,99E-02 1,50E-08 2,99E-02 2,99E-02	1,11E+02 1,80E-04 1,11E+02 1,11E+02	1,97E-03 7,83E-10 1,97E-03 1,97E-03	1,04E-02 2,35E-09 1,04E-02 1,04E-02
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	$\bar{x}$ s Máx Min	1,66E+05 1,17E+03 1,68E+05 1,65E+05	3,00E-02 2,11E-04 3,03E-02 2,99E-02	1,12E+02 7,88E-01 1,13E+02 1,11E+02	1,98E-03 1,39E-05 2,00E-03 1,97E-03	1,05E-02 7,37E-05 1,06E-02 1,04E-02
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade =	$\bar{x}$ s Máx Min	1,66E+05 1,43E+03 1,68E+05 1,65E+05	3,01E-02 2,59E-04 3,03E-02 2,99E-02	1,12E+02 9,65E-01 1,13E+02 1,11E+02	1,98E-03 1,70E-05 2,00E-03 1,97E-03	1,05E-02 9,03E-05 1,06E-02 1,04E-02

0,8 cm/s						
Nº passes = 2;	$\bar{x}$	1,67E+05	3,02E-02	1,12E+02	1,99E-03	1,05E-02
Vazão = 36,0	s	1,24E+03	2,24E-04	8,36E-01	1,48E-05	7,82E-05
l/min;	Máx	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
Velocidade =	Min	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
1,6 cm/s						
Nº passes = 4;	$\bar{x}$	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Vazão = 36,0	s	1,74E-01	2,57E-08	6,33E-05	3,09E-09	2,88E-10
l/min;	Máx	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Velocidade =	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
0,3 cm/s						
Nº passes = 4;	$\bar{x}$	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Vazão = 36,0	s	7,50E-01	5,15E-07	1,37E-04	2,99E-09	1,15E-08
l/min;	Máx	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Velocidade =	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
0,8 cm/s						
Nº passes = 4;	$\bar{x}$	1,68E+05	3,03E-02	1,13E+02	2,00E-03	1,06E-02
Vazão = 36,0	s	1,65E+03	2,99E-04	1,11E+00	1,97E-05	1,04E-04
l/min;	Máx	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
Velocidade =	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
1,6 cm/s						
Nº passes = 6;	$\bar{x}$	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Vazão = 36,0	s	5,68E-01	1,79E-08	2,56E-04	2,95E-09	8,91E-11
l/min;	Máx	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Velocidade =	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
0,3 cm/s						
Nº passes = 6;	$\bar{x}$	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Vazão = 36,0	s	1,72E-01	5,32E-07	7,02E-05	3,07E-09	5,07E-10
l/min;	Máx	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
Velocidade =	Min	1,65E+05	2,99E-02	1,11E+02	1,97E-03	1,04E-02
0,8 cm/s						
Nº passes = 6;	$\bar{x}$	1,67E+05	3,02E-02	1,12E+02	1,99E-03	1,05E-02
Vazão = 36,0	s	1,24E+03	2,24E-04	8,36E-01	1,48E-05	7,82E-05
l/min;	Máx	1,68E+05	3,05E-02	1,14E+02	2,01E-03	1,06E-02
Velocidade =	Min	1,66E+05	3,00E-02	1,12E+02	1,98E-03	1,05E-02
1,6 cm/s						

Fonte: elaborado pelo autor

Pela Tabela 13 verificou-se que os impactos no CVP para PAG variaram de 1,65E+05 a 1,68E+05 kg de CO_{2-eq.}, enquanto que para PDRA os impactos foram de 2,99E-02 kg a 3,05E-02 de Sb_{-eq.}. Já para PFMP os impactos foram de 1,11E+02 a 1,14E+02 kg PM_{2,5-eq.}, enquanto que para PTHC e PTHNC, os impactos foram, respectivamente, de 1,91E-03 a 2,01E-03 CTUh, e de 1,04E-02 a 1,06E-02 CTUh.

Assim, percebe-se que a variação nos resultados dos impactos por categoria avaliada foi da ordem de 2,00%, e isso se deve a baixa influência dos tratamentos avaliados sobre os impactos no CVP. Além disso, verificou-se pela seção G.2 do **Apêndice G** que os requisitos rugosidade, circularidade e diâmetro final da haste apresentaram uma baixa influência sobre

o consumo de gasolina no *uso 2*. Logo, isso explica o porquê da baixa variabilidade nos resultados dos impactos potenciais da Tabela 13 entre os 27 tratamentos conduzidos.

Resultados da avaliação e monitoramento: Etapa 8

Os resultados da validação do modelo de ANOVA para os 27 tratamentos analisados no estudo de caso, são apresentados na Figura 81 para a categoria PAG.

Figura 81 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para a categoria PAG – estudo de caso 2.

Fonte: elaborado pelo autor

* NP – Número de passes na dressagem; VF – vazão de fluido; VD – velocidade de dressagem

Na Figura 81, os resultados mostram que o modelo de ANOVA foi validado, pois para o teste de normalidade utilizando o método de Anderson-Darling (AD), o p-valor dos resíduos estatísticos foi maior que 5,0% (0,668). Já pelo teste de Bartlett (BT), também foi verificada a homogeneidade das variâncias dos resíduos estatísticos para 95,0% de intervalo

de confiança, sendo que o p-valor foi de 0,744. Por último, também foi verificada a independência dos resíduos estatísticos, pois não foi identificada a aglomeração de resíduos.

Resultados análogos aos da Figura 81 foram verificados durante a validação do modelo de ANOVA para PDRA, PFMP, PTHC, e PTHNC, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos testes de validação da ANOVA para as categorias PDRA, PFMP, PTHC e PTHNC

Testes de validação	PDRA	PFMP	PTHC	PTHNC
AD	0,668	0,668	0,668	0,668
BT	0,744	0,744	0,744	0,744
Independência de resíduos	Sem aglomerações	Sem aglomerações	Sem aglomerações	Sem aglomerações

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, na Tabela 15 seguem os resultados da ANOVA após concluída a validação de suas premissas. Foi executada a ANOVA para os fatores NP, VF e VD, e suas interações. Nota-se na Tabela 15 que todos os fatores e interações foram considerados não significativos pela ANOVA, implicando em resultados estatisticamente equivalentes. Isso se deve a discussão já realizada anteriormente ao final da **Etapa 7**, onde foi explicado que a diferença percentual entre os impactos calculados foi mínima para todas as categorias avaliadas.

Tabela 15 – Resultados da ANOVA do planejamento experimental envolvendo os 27 tratamentos

Fatores	PAG	PDRA	PFMP	PTHC	PTHNC
NP	0,593	0,621	0,388	0,321	0,469
VF	0,008	0,328	0,276	0,462	0,284
VD	0,213	0,140	0,632	0,317	0,367
NP X VF	0,891	0,515	0,421	0,462	0,415
NP X VD	0,784	0,486	0,570	0,359	0,614
VF X VD	0,923	0,593	0,326	0,651	0,387
NP X VF X VD	0,975	0,822	0,443	0,527	0,521

Fonte: elaborado pelo autor

Assim, durante a execução da ANOVA não foi possível encontrar fatores com influência significativa sobre os impactos do CVP, e consequentemente, também não foi possível selecionar a melhor condição experimental para a usinagem das válvulas. Portanto, qualquer uma das 27 condições experimentais avaliadas pode ser adotada no estudo da usinagem *centerless* da haste das válvulas, pois os impactos potenciais avaliados se mostraram estatisticamente equivalentes para o CVP.

Por outro lado, é possível destacar as melhores condições sob o ponto de vista do desempenho técnico do processo de retificação. Assim, pelos resultados da seção F.2 do **Apêndice F**, verificou-se que nem todos os RTQP avaliados foram atendidos pelos 27

tratamentos executados. Apenas 7 tratamentos apresentaram resultados condizentes simultaneamente com os valores esperados de rugosidade Ra (0,5 μm), circularidade RONT (10 μm), e diâmetro final (5,62 mm), sendo: 1) **NP: 4, VF: 18 l/min, VD: 0,3 cm/s**; 2) **NP: 6, VF: 18 l/min, VD: 0,3 cm/s**; 3) **NP: 6, VF: 18 l/min, VD: 0,8 cm/s**; 4) **NP: 4, VF: 25 l/min, VD: 0,3 cm/s**; 5) **NP: 6, VF: 25 l/min, VD: 0,8 cm/s**; 6) **NP: 4, VF: 36 l/min, VD: 0,3 cm/s**; e 7) **NP: 6, VF: 36 l/min, VD: 0,3 cm/s**. Portanto, a retificação adotando valores de 4-6 passes na dressagem, e VD de 0,3-0,8 cm/s, possibilitou a obtenção de peças usinadas com a qualidade técnica esperada ao término do processo de manufatura.

Resultados da pós-avaliação: Etapa 9

Como não foi possível encontrar a melhor condição experimental para a realização do processo de usinagem, as atividades da **Etapa 9** foram limitadas. Os impactos do CVP não foram estratificados conforme proposto no procedimento de *GM* da seção 4.1.2, utilizando Gráficos de Dispersão e a Análise de Sensibilidade. Afinal, os experimentos realizados não foram capazes de apresentar efeitos significativos sobre os impactos no CVP.

Então, daqueles 7 tratamentos destacados na **Etapa 8**, foi escolhida a condição **NP: 4, VF: 18 l/min, VD: 0,3 cm/s** para a análise de *hotspots* ambientais. Assim, a Figura 82 mostra os resultados dos impactos estratificados para a categoria de PAG, sendo que curvas equivalentes foram encontradas também para PDRA e PFMP. Já a Figura 83 apresenta os resultados dos impactos estratificados para a categoria PTHC, sendo que os mesmos destaques foram também encontrados para a categoria PTHNC.

Os resultados da Figura 82 mostram que os impactos para PAG estão intrinsicamente associados à etapa de uso do produto (99,99%), em decorrência do consumo de gasolina durante o *uso 2* do motor. Contudo, olhando somente para os impactos da manufatura, foi verificado que todos os impactos foram indiretos (principalmente consumo de eletricidade e fluido de corte), e que os mesmos ocorreram principalmente nos modos de retificação (42,10%), espera (37,92%), e dressagem (19,88%). Portanto, mais de 50,00% dos impactos da manufatura ocorreram quando a retificadora não estava produzindo nenhuma nova peça, em virtude principalmente do consumo de fluido de corte. Entre as subunidades, destacou-se a lubrificação, responsável por 66,82% dos impactos, seguido das subunidades de dressagem dos rebolos de corte (27,61%) de e arraste (5,50%).

Figura 82 – Análise de *hotspots* do processo de retificação *centerless* – PAG (kg CO₂-eq.)

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 83 os impactos para PTHC também se mostraram intrinsicamente associados à etapa de uso do produto (99,99%). Porém, tomando apenas os impactos da manufatura, foi verificado que todos os impactos foram indiretos, e que os mesmos ocorreram principalmente no modo de retificação (97,37%). Entre as subunidades, destacou-se a lubrificação, responsável por 99,08% dos impactos, os quais estão associados a geração de aerossóis na retificação em virtude do consumo de fluido de corte.

Figura 83 – Análise de *hotspots* do processo de retificação *centerless* – PTHC (CTUh)

Fonte: elaborado pelo autor

O Quadro 42 apresenta os principais *hotspots* investigados durante o estudo do processo de retificação. Apesar dos *hotspots* destacados, é importante lembrar que mais de 95,00% dos impactos no ciclo de vida das válvulas automotivas estão associados à etapa de uso do produto (*uso 2*), e que o processo de retificação estudado não apresentou potencial de influenciar em tais impactos a jusante para nenhuma das cinco categorias de impacto avaliadas. Desse modo, a análise de cenários da Figura 84 foi proposta, tendo em vista analisar as sugestões de melhoria listadas no Quadro 42 para PAG, portanto:

- **Cenário 1:** redução do consumo de fluido de corte nos modos de espera e dressagem. Consumo de fluido na espera foi igual a zero, e o consumo no modo de dressagem foi igual a vazão de retificação (18,0 l/min);
- **Cenário 2:** redução no tempo de espera padrão (i.e., 30 s) em 50,0%.

Categorias de impacto	Detalhamento dos <i>hotspots</i> ambientais		
	Etapas do ciclo de vida de destaque	Principais aspectos ambientais	Possível solução para reduzir/eliminar o <i>hotspot</i>
PAG	Manufatura	Consumo de fluido de corte	- Reduzir o consumo de fluido de corte, especialmente quando a máquina não estiver produzindo, i.e., nos modos de espera e dressagem.
PDRA			
PFMP			
PTHC		Emissão ao ar de aerossóis devido ao consumo de fluido de corte na retificação.	- Reduzir o consumo de fluido na retificação e/ou instalar equipamentos para controle de emissão do poluente.
PTHNC			

Quadro 42 – Lista de *Hotspots* ambientais – estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

Vale ressaltar que na Figura 84 a visão de CVP não foi analisada, mas sim, foi dado foco somente aos modos de operação da retificadora, visto que as sugestões de melhoria do Quadro 42 não apresentam efeitos significativos sobre o CVP.

Figura 84 – Análise de cenários para redução dos *hotspots* da retificação *centerless* – PAG (kg CO₂-eq.)

Fonte: elaborado pelo autor

A partir dos cenários da Figura 84, também foi realizado um cenário combinando os resultados dos cenários 1 e 2. Além disso, o cenário de referência (NP= 4; VF= 18,0 l/min; VD= 0,3 cm/s) também é apresentado na figura, assim como o cenário NP= 6; VF= 36,0 l/min; VD= 0,3 cm/s, que se remete ao cenário com os maiores resultados de impactos potenciais para PAG. Desse modo, verifica-se um potencial de redução de impactos para PAG em até 71,0% durante o modo de espera da retificadora, e até 42,0% no modo de dressagem, caso seja adotada a condição de manufatura NP= 4; VF= 18,0 l/min; VD= 0,3 cm/s – combinada com os cenários 1 e 2.

Por fim, foi investigada a proposição de indicadores de desempenho para o ciclo de vida das válvulas a partir dos parâmetros de processo estudados (NP, VF, e VD). Para isso, modelos de regressão (quadrático completo) foram delineados e testados por meio da ANOVA, e a Tabela 16 apresenta os resultados.

Tabela 16 – Resultados da ANOVA dos modelos de regressão – estudo de caso 2

Fatores	P-valor (ANOVA da Regressão)				
	PAG	PDRA	PFMP	PTHC	PTHNC
c^{te}	0,051	0,293	0,362	0,595	0,387
NP	0,847	0,923	0,984	0,982	0,995
VF	0,792	0,930	0,859	0,794	0,743
VD	0,596	0,739	0,823	0,998	0,949
NP·VF	0,973	0,965	0,971	0,988	0,982
NP·VD	0,879	0,958	0,969	0,936	0,993
VF·VD	0,927	0,931	0,963	0,992	0,979
NP·VF·VD	0,981	0,965	0,982	0,910	0,986
NP ²	0,996	0,996	0,964	0,926	0,997
VF ²	0,993	0,994	0,990	0,995	0,993
VD ²	0,373	0,619	0,720	0,987	0,941
Regressão	0,066	0,911	0,786	0,484	0,083
R ²	16,49%	3,58%	6,09%	4,23%	3,11%

Fonte: elaborado pelo autor

A partir da Tabela 16, todos os modelos gerados foram considerados não significativos pela ANOVA, pois os valores de p-valor foram maiores que 5,00% para as cinco variáveis-resposta investigadas. Além disso, os coeficientes de determinação ajustado variaram entre 3,11 a 16,49%, mostrando a ineficiência dos modelos em prever as variáveis-resposta.

Em suma, não foi possível determinar modelos matemáticos de previsão dos impactos potenciais no ciclo de vida das válvulas automotivas a partir das três variáveis de processo estudadas (NP, VD, e VF). Isso pode estar relacionado ao fato de que dois dos três parâmetros de processo escolhidos não estarem diretamente relacionados à retificação das válvulas, no caso, NP e VD. Afinal, esses parâmetros estão diretamente associados somente à dressagem do reboło de corte. Já a vazão VF, ela sim pode ser assumida como uma

variável diretamente envolvida com a retificação. Assim, poderia ser realizado um estudo substituindo NP e VD por outras variáveis relevantes diretamente envolvidas com a retificação da haste, tais como velocidade de corte na retificação e a taxa de remoção de material na usinagem. Outra possibilidade, seria a execução de novos modelos de regressão considerando somente os impactos potenciais da manufatura, excluindo a parcela dos impactos à jusante, visto que a retificação *centerless* se mostrou não significativa em influenciar os impactos nas etapas de uso e de pós-uso.

Resultados da pós-avaliação: Etapa 10

Como não foi possível a determinação de modelos matemáticos para utilização como indicadores ambientais do ciclo de vida das válvulas automotivas, a aplicação da **Etapa 10** para o estudo de caso 2 foi limitada. Assim, o foco aqui deveria ser apenas na implementação de um cronograma de atividades visando a redução dos *hotspots* ambientais listados no Quadro 42 da **Etapa 9**. Ao mesmo tempo, poderia também ser realizado um estudo direcionado para a melhoria ambiental do *processamento da cabeça* das válvulas, visto que este processo foi considerado prioritário durante a **Etapa 4** do procedimento.

Devido às diversas etapas e ao nível de informações detalhadas requerido para execução do procedimento de *GM* proposto nesta tese, e também em virtude das limitações ocorridas principalmente durante a condução no estudo de caso 2, a seguir, são propostas algumas simplificações para o procedimento originalmente desenvolvido.

4.3. Versões simplificadas do procedimento de *GM* desenvolvido

Dornfeld et al. (2013) e OECD DSTI (2011) citam que para que haja a adoção da *GM* ou da Manufatura Sustentável, é necessário antes desenvolver mecanismos que tornem mais fácil a aplicação desses conceitos no ambiente fabril. Porém, diversas etapas, ferramentas e atividades foram adotadas no procedimento de *GM* apresentado na seção 4.1.2, o que pode tornar o uso do mesmo complexo, e por consequência, comprometer sua aplicabilidade na indústria. Por exemplo, ao longo da seção 4.1.2 foi proposta a utilização de 5 diferentes diagramas, 8 matrizes, 11 equações matemáticas, além do emprego de diferentes softwares, como o GaBi 6.5 para a modelagem dos estudos de ACV, e o Minitab 17 para a condução das análises estatísticas nos dois estudos de caso. Além disso, a ACV foi utilizada durante as macroetapas de **pré-avaliação** e de **avaliação e monitoramento ambiental**, o que também contribuiu para tornar mais complexa a aplicabilidade do procedimento.

Assim, visando minimizar essas limitações/barreiras, a seguir, são propostas simplificações nas etapas de aplicação do procedimento de *GM* originalmente desenvolvido. Para isso, inicialmente foram definidos os objetivos principal e secundários da Figura 85, sendo que os termos *in-depth approach* e *screening approach* foram designados para se referirem ao grau de detalhamento ou de complexidade requerido ao estudo. Também, a Figura 85 mostra que estudos do tipo *in-depth approach* necessitam de mais recursos (financeiros, infraestrutura, informações, pessoas) para sua execução do que os estudos do tipo *screening approach*.

Figura 85 – Objetivos principal e secundários para utilização do procedimento de *GM* desenvolvido
Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 85, uma vez que o usuário opte pelo objetivo principal, então o estudo de *GM* será do tipo *in-depth approach*, e deverá ser realizado baseado nas dez etapas de aplicação do procedimento de *GM* originalmente desenvolvido, seguindo a mesma lógica de execução das seções 4.2.1 e 4.2.2 para os estudos de caso desta tese. Por outro lado, se o objetivo escolhido for secundário, o estudo será do tipo *screening approach*, e simplificações no procedimento de *GM* original poderão ser realizadas.

O objetivo principal na Figura 85 se remete diretamente à definição de *GM* adotada nesta tese (rever seção 4.1.2), e, a partir dela, foram derivados três objetivos secundários:

- **Obter um perfil ambiental do CVP:** uma empresa pode estar interessada somente em conhecer melhor o perfil ambiental do ciclo de vida de um determinado produto. Neste caso, apenas a realização da macroetapa de **pré-avaliação** já seria suficiente para cumprir com o objetivo. Além disso, dispondo-se apenas dos resultados da **pré-avaliação**, a empresa interessada já seria capaz de observar o grau de contribuição de cada processo de manufatura para os impactos no CVP, e a classificação individual de cada processo segundo os Tipos I,

II e III. Assim, das dez etapas originais do procedimento, somente as quatro primeiras seriam necessárias aqui, conforme o conjunto de atividades da Figura 38 da seção 4.1.2;

- **Melhorar processos de manufatura específicos:** este objetivo secundário vai de encontro ao escopo da maior parte das proposições teóricas de *GM* analisados na seção 4.1.1, que objetivaram identificar possibilidades de melhorias ambientais em processos de manufatura específicos (e.g., usinagem, prensagem, etc.). Neste caso, seria necessário apenas a realização da macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental** e a inclusão da **Análise de Hotspots** da Etapa 9 da **pós-avaliação**, como mostra a Figura 86; e
- **Selecionar indicadores de desempenho ambiental:** há estudos de *GM* que focaram somente a seleção de indicadores de desempenho relevantes, como por exemplo, os autores Araújo (2010), Eastwood e Haapala (2015), Garbie (2014), Joung et al. (2012), Kim et al. (2015), Lee, Kang e Noh (2014), OECD DSTI (2011), e Zhang, Calvo-Amodio e Haapala (2013). Assim, os usuários interessados apenas em utilizar o procedimento de *GM* proposto nesta tese para selecionar indicadores ambientais, deverão focar somente nas etapas 5, 6, e 7 da **avaliação e monitoramento ambiental**, e a inclusão da etapa 9 da **pós-avaliação** (ver Figura 87).

Figura 86 – Atividades simplificadas no procedimento de *GM* para o objetivo: *melhorar processos de manufatura específicos*

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 86, a versão simplificada do procedimento de *GM* apresenta cinco atividades opcionais, sendo que elas foram assim classificadas em virtude dos resultados dos estudos de caso das seções 4.2.1 e 4.2.2, sendo:

- **Etapa 5:** a utilização do Diagrama de Relações para a inclusão dos fluxos indiretos de infraestrutura é uma atividade opcional, pois os dois estudos de caso executados nesta tese mostraram que a influência desses fluxos indiretos pode ser considerada desprezível sobre os impactos potenciais no CVP. Assim, se o valor calculado para o fator f (rever Equações 10 e 11) for consideravelmente pequeno (e.g., $f < 1000$), então, a inclusão de tais fluxos pode ser excluída da modelagem;
- A seleção dos RTQP se mostra uma atividade desnecessária na **Etapa 5**, caso o objetivo do estudo de *GM* seja somente melhorar ambientalmente algum processo de fabricação específico. Nessa mesma linha, na **Etapa 6** podem ser excluídas as atividades de quantificação dos aspectos ambientais indiretos da manufatura, e a utilização da Matriz de Correlação de requisitos com as etapas a jusante da manufatura. E na **Etapa 7**, pode ser excluído do escopo do procedimento a atividade de quantificação dos impactos potenciais a jusante. Contudo, se for de interesse incluir a visão completa de CVP, então, todas essas atividades mencionadas deverão ser mantidas na versão simplificada do procedimento de *GM*.
- Outra simplificação é a não necessidade de realizar a ANOVA da **Etapa 8**, e nem a utilização do Gráfico de Dispersão e a Análise de Sensibilidade, assim como também os modelos de regressão da **Etapa 9**. Tal situação será aplicável quando os resultados da **Etapa 7** apresentarem uma baixa diferença percentual entre os impactos do CVP. Essa situação foi verificada no estudo de caso da seção 4.2.2, onde o processo de retificação estudado apresentou na **Etapa 7** diferenças percentuais entre os impactos do ciclo de vida das válvulas da ordem de 2,00% para todos os 27 tratamentos e cinco categorias de impacto analisadas. Em consequência, os resultados das **Etapas 8** e **9** foram limitados. Na **Etapa 8**, foi verificado que todos os 27 tratamentos analisados foram considerados estatisticamente equivalentes, e por isso, na **Etapa 9**, a aplicação dos Gráficos de Dispersão e a da Análise de Sensibilidade foram excluídos do escopo do estudo, e os resultados dos modelos de regressão também não foram significativos.

Nota-se que a versão simplificada do procedimento de *GM* da Figura 87 apresenta as mesmas cinco atividades opcionais da Figura 86, e inclui ainda:

- **Etapa 9:** a estratificação dos impactos do CVP é uma atividade desnecessária, pois nos estudos de caso das seções 4.2.1 e 4.2.2 ela serviu de base apenas para a **Análise**

de Hotspots. Porém, se o foco aqui for a sugestão de indicadores de desempenho ambiental, a única atividade a ser mantida na **Etapa 9** seria a aplicação dos modelos matemáticos de regressão.

Figura 87 – Atividades simplificadas no procedimento de GM para o objetivo: *selecionar indicadores de desempenho ambiental*

Fonte: elaborado pelo autor

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Foi realizada a proposta de desenvolver e de testar um novo procedimento de *GM* integrado a ACV para a avaliação e o monitoramento ambiental de processos de manufatura.

Dentre as principais conclusões do estudo destacam-se:

- Uma nova definição para o conceito de *GM* foi proposta nesta tese, tendo em vista que a maior parte das definições consultadas na literatura não integraram a visão de CVP. Além disso, a nova definição desenvolvida introduziu a ideia de melhorar continuamente o CVP por meio da melhoria dos processos de fabricação mais críticos na indústria;
- Ao todo, 333 artigos foram selecionados e analisados na literatura, e diversas limitações foram identificadas nos mesmos, as quais serviram de base para o desenvolvimento do novo procedimento de *GM* desta tese. Entre as principais limitações do destacaram-se: 1) a falta de um procedimento para a seleção dos processos mais relevantes dentro da etapa de manufatura; 2) limitação na inclusão da visão completa de CVP, pois a maioria dos estudos focou somente em processos de fabricação isolados; 3) limitação quanto ao emprego da ACV, pois muitos estudos focaram somente no ICV e não incluíram a AICV; 4) muitos artigos assumiram a etapa de manufatura como um *black-box*, o que dificulta a realização de uma análise mais completa, por exemplo, em nível das operações de manufatura e das subunidades existentes (e.g., máquina-ferramenta, sistemas auxiliares); 5) nenhum dos artigos analisou como que a etapa de manufatura poderia influenciar os impactos ambientais das etapas de uso e de pós-uso dos produtos manufaturados; e 6) entre os artigos que realizaram propostas de indicadores de desempenho ambiental, verificou-se que a maioria focou apenas nos aspectos e não nos impactos potenciais, e não incluíram a visão de CVP;
- De modo a superar tais limitações supracitadas, o procedimento de *GM* desenvolvido foi composto por três macroetapas, sendo que cada uma envolveu um conjunto de etapas específicas. A macroetapa de **pré-avaliação** foi organizada em quatro etapas, e focou na identificação dos processos de manufatura mais críticos na visão de CVP. A macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental** foi organizada em quatro etapas, e possibilitou identificar a melhor condição de manufatura que permitisse a redução dos impactos ambientais potenciais não somente no processo de fabricação, mas sim, na visão de CVP. E por fim, a macroetapa de **pós-avaliação** foi organizada em duas etapas, e objetivou analisar *hotspots* ambientais e propor indicadores de desempenho ambiental para o CVP;
- Dois estudos de caso foram executados para testar o procedimento de *GM* proposto. Foi realizado um estudo de caso numa indústria madeireira produtora de painéis para uso

pelo setor mobiliário, e outro estudo numa indústria produtora de válvulas para uso em motores de veículos. As 3 macroetapas do procedimento de *GM* foram conduzidas para os dois estudos de caso, contudo, diferentes resultados e conclusões foram observadas;

- O estudo de caso na indústria de painéis mostrou que na **pré-avaliação** o processo de prensagem à quente foi destaque, tendo sido classificado como Tipo II. As principais categorias de impacto afetadas pelo processo foram PTHC, PAG e PFFO, enquanto que os principais aspectos ambientais foram o consumo de eletricidade e as emissões ao ar de formaldeído livre. Assim, durante a macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**, foi mostrado que a prensagem à quente com pressão de 3,0MPa e temperatura de 160,0°C, foi o melhor tratamento entre as 12 condições estudadas, tendo em vista a minimização dos impactos do CVP. Durante a macroetapa de **pós-avaliação**, para as categorias PTHC e PFFO e condição de 3,0 MPa; 160,0°C, foi proposta a redução do consumo de resina UF e/ou a instalação de equipamentos para controle de emissão de formaldeído livre no processo de prensagem, visto que o poluente foi responsável por mais de 99,00% dos impactos para essas categorias. Já para PAG, foi verificado que aproximadamente 50,00% dos impactos ocorrem a montante, devido ao consumo de eletricidade na prensa, e assim, foi sugerida a redução do tempo de aquecimento da prensa durante o modo de operação de iniciação. Também, cerca de 30,00% dos impactos para PAG ocorreram durante o pós-uso do produto, e desse modo, foi recomendado que a densidade do painel consolidado no processo de prensagem não ultrapassasse 0,53 g/cm³. Por fim, indicadores de desempenho ambiental foram propostos para PAG, PTHC e PFFO. Os modelos obtidos apresentaram R² ajustado de 52,00 a 86,67%. Os impactos no CVP para PAG se mostraram estreitamente dependentes da pressão de prensagem, sendo possível prever os impactos para esta categoria apenas ajustando os valores da pressão. Já para PFFO e PTHC, tanto a pressão quanto a temperatura de prensagem se mostraram relevantes nos modelos gerados;

- Sobre o estudo de caso na indústria produtora de válvulas, durante a **pré-avaliação** o processo de retificação *centerless* da haste foi destacado, tendo sido classificado como Tipo III. As principais categorias de impacto foram PDRA, PAG, PFMP, PTHC, e PTHNC, enquanto que os principais aspectos ambientais foram o consumo de eletricidade e o consumo de fluido de corte na retificação. Durante a macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**, foi mostrado que todos os 27 tratamentos avaliados se apresentaram estatisticamente equivalentes, não tendo sido encontrada nenhuma condição de manufatura que demonstrasse reduções significativas dos impactos para o CVP. Por outro lado, a condição utilizando vazão de fluido de corte de 18 l/min, 4 passes e 0,3 cm/s de velocidade de corte na dressagem do rebolo de corte, possibilitou a obtenção de peças com melhor qualidade quanto ao acabamento (rugosidade, circularidade, e diâmetro final).

Assim, para essa condição de manufatura, durante a **pós-avaliação**, foram analisados os *hotspots* ambientais para PAG, PDRA, PFMP, PTHC e PTHNC, tendo sido sugerida a seguinte recomendação: reduzir o consumo de fluido de corte, especialmente nos modos de retificação, espera e dressagem. Sobre os indicadores de desempenho ambiental, não foi possível obter modelos matemáticos significativos, e os coeficientes R^2 ajustados foram de 3,11 a 16,49%. Isso ocorreu devido a influência insignificante do processo de retificação sobre os impactos do ciclo de vida das válvulas, especialmente durante o uso das mesmas (etapa onde ocorreram mais de 95,00% dos impactos no CVP);

- Contrariando grande parte dos estudos de *GM* da literatura que exaltaram o consumo de eletricidade como o principal fator que contribui para os impactos ambientais dos processos de fabricação, a partir dos dois estudos de caso desta tese, percebeu-se que nem sempre o consumo de eletricidade foi o principal *hotspot*. Como foi visto no caso dos painéis de madeira, a resina UF foi o principal *hotspot* na visão de CVP; já no estudo das válvulas automotivas, o consumo de fluido de corte foi outro exemplo de *hotspot*;
- Para o estudo envolvendo as válvulas automotivas, verificou-se que o processo de retificação não foi efetivo em influenciar os impactos potenciais das etapas a montante e a jusante da manufatura. Isso pode estar relacionado à diversos fatores: 1) **tipo de processo de manufatura**. Processos Tipo I foram aqueles que apresentaram maior potencial em influenciar os impactos de todas as etapas do CVP, seguido dos processos Tipo II, e Tipo III. Porém, o processo de retificação foi classificado como Tipo III na **pré-avaliação**, logo, trata-se de um tipo de processo relativamente menos importante. Já no estudo de caso com os painéis de madeira, o processo de prensagem à quente foi Tipo II, e assim, apresentou potencial de influenciar de modo mais efetivo os impactos tanto à montante quanto à jusante da manufatura; 2) **Tipo de RTQP selecionado para o estudo**. No estudo com as válvulas automotivas, os RTQP selecionados foram a rugosidade, a circularidade e o diâmetro final da haste, contudo, tais requisitos podem ser considerados como de micro escala, comparativamente aos requisitos escolhidos durante o estudo envolvendo os painéis de madeira (densidade, espessura, e inchamento em espessura). A densidade, espessura e o inchamento em espessura são requisitos de macro escala, pois efetivamente influenciam na massa e no volume dos painéis de madeira. Desse modo, é possível inferir que um RTQP de macro escala, provavelmente resultará num efeito mais significativo sobre os impactos a jusante da manufatura comparativamente a um requisito de micro escala; e 3) **Grau de relevância sobre o uso final do produto**. Ao se avaliar produtos intermediários, como as válvulas automotivas, é importante ressaltar que a representatividade dessas peças no produto final (motores de veículos) pode ser considerada desprezível, afinal, um motor é composto por centenas de outros componentes, dos quais muitos são mais representativos no

produto final, por exemplo, em termos de massa/volume. Já no caso do painel de madeira, sua representatividade no produto final (móveis de madeira) é consideravelmente maior, pois a maior parte dos componentes dos móveis de madeira são obtidos a partir dos painéis.

Sob a justificativa de tornar sua aplicabilidade mais fácil no ambiente fabril, três versões simplificadas do procedimento de *GM* originalmente desenvolvido foram propostas. Cada versão simplificada foi direcionada a um objetivo específico de um estudo de *GM*:

- **Obter um perfil ambiental do CVP:** no caso de uma empresa estar interessada apenas em conhecer melhor o perfil ambiental do CVP, é possível simplificar a aplicação do procedimento completo de *GM* através da aplicação de somente suas quatro primeiras etapas, isto é, através da realização da macroetapa de **pré-avaliação**;
- **Melhorar processos de manufatura específicos:** visa identificar possibilidades de melhorias ambientais em processos de manufatura (e.g., usinagem, prensagem, etc.) previamente selecionados. No caso, seria preciso apenas realizar a macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental** e incluir a **Análise de Hostspots** da **pós-avaliação**; e
- **Selecionar indicadores de desempenho ambiental:** os usuários interessados apenas em utilizar o procedimento de *GM* proposto nesta tese para selecionar indicadores ambientais relevantes, deverão focar somente nas etapas 5, 6, e 7 da macroetapa de **avaliação e monitoramento ambiental**, e na inclusão da etapa 9 da **pós-avaliação**.

Finalmente, as principais dificuldades desta pesquisa realizada foram:

- Tanto o procedimento de *GM* completo quanto as suas três versões simplificadas requerem a coleta, a gestão e o processamento de uma grande quantidade de dados quantitativos e qualitativos sobre o CVP e sobre os processos de manufatura de interesse. Logo, isso pode gerar problemas durante o uso do procedimento no ambiente fabril;
- Nessa mesma linha, para a aplicação do procedimento de *GM* completo ou simplificado, foram utilizados diferentes softwares, como o GaBi 6.5 para a ACV dos produtos e processos estudados e o software Minitab 17 para as análises estatísticas. Além disso, diversos diagramas, matrizes e questionários também foram utilizados. Assim, uma empresa interessada em utilizar tal procedimento desenvolvido deverá também dispor de conhecimento prévio sobre o uso de tais ferramentas de auxílio, o que pode vir a se tornar uma limitação relevante quanto a aplicabilidade prática do procedimento nas indústrias.

5.2 Sugestões para trabalho futuros

- Em virtude das principais limitações abordadas na seção 5.1, sugere-se que seja desenvolvido um programa computacional que possa executar e gerenciar as etapas de aplicação do procedimento de *GM* proposto nesta tese. O desenvolvimento da referida ferramenta traria como principal benefício a redução da complexidade e da demanda por recursos (de tempo, pessoas, infraestrutura, etc.) para a condução dos estudos de *GM*;
- A proposta de desenvolver uma ferramenta computacional para auxiliar nos estudos de *GM* está alinhada com trabalhos prévios da literatura como Garbie (2014), Larreina et al. (2013), Lee, Kang e Noh (2014), Narita, Kawamura e Norihisa (2006), Shao e Kibira (2010), Sproedt et al. (2015) e Zhao (2015), os quais propuseram diversas ferramentas do gênero. Assim, tais referências bibliográficas poderiam servir de norte para o desenvolvimento da nova ferramenta mencionada;
- Sobre a proposta do procedimento de *GM*, se sugere que o mesmo seja também testado em outras indústrias de manufatura não contempladas pelos dois estudos de caso executados nesta pesquisa. Além disso, poderia ser realizada uma validação do procedimento proposto através de um painel de especialistas da área de *GM*;
- Os dois estudos de caso avaliados nesta tese foram conduzidos a partir do uso do método **ILCD/PEF recommendation v. 1.06**. Assim, sugere-se que outros métodos também sejam investigados, visando analisar se as conclusões podem variar ou não significativamente para cada estudo de caso em função da escolha do método de AICV;
- Para o estudo de caso envolvendo o processo de prensagem à quente dos painéis de madeira, se sugere que outras variáveis sejam investigadas além da pressão e da temperatura de prensagem. Por exemplo, o tempo de prensagem dos painéis poderia ser um parâmetro a ser explorado em trabalhos futuros utilizando o procedimento de *GM* desenvolvido;
- E sobre o estudo do processo de retificação *centerless* das válvulas automotivas, se sugere que outros trabalhos utilizando o procedimento de *GM* desenvolvido sejam realizados. Contudo, o foco deverá ser apenas na etapa de manufatura das válvulas, afinal, como discutido previamente, os impactos do processo de retificação sobre as etapas a montante e a jusante do CVP não foram relevantes. Outras variáveis de processo a serem estudadas além das avaliadas nesta pesquisa poderiam envolver a velocidade de corte na retificação e a taxa de remoção de material na usinagem.

REFERÊNCIAS

- AHN, S.-H. An Evaluation of green manufacturing technologies based on research databases. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v.1, n.1, p. 5-9, 2014.
- ALLEN, D. et al. Environmentally benign manufacturing: trends in Europe, Japan, and the USA. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v.124, n. 4, p. 908-920, 2002.
- ALLWOOD, J.M.; CULLEN, J.M. Steel, aluminium and carbon: alternative strategies for meeting the 2050 carbon emissions targets. In: R'09 TWIN WORLD CONGRESS / WORLD RESOURCES FORUM, 2009, Davos. **Proceedings...** Davos: [s.n.], 2009. p.1-6.
- ANJOS JÚNIOR, A.H. **Gestão estratégica do saneamento**. São Paulo: Manole, 2011.
- ARAÚJO, J.B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade**. 2010. 193f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/IR 14062**: Gestão ambiental – integração de aspectos ambientais no projeto e desenvolvimento do produto. Rio de Janeiro, 2004a.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004b.
- _____. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009a.
- _____. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009b.
- _____. **NBR ISO 14050**: Gestão ambiental – vocabulário. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 14810**: Chapas de madeira aglomerada. Rio de Janeiro, 2013.
- BARBIERI, J.C. **Gestão ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos. 2.ed. São Paulo: Saraiva, 2007.
- BARE, J. et al. Traci, the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impact. **Journal of Industrial Ecology**, v.6, n.3/4, p.49-78, 2003.
- BEHRENDT, T. et al. Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools. **CIRP Annals - manufacturing technology**, v. 61, n.1, p.43-46, 2012.
- BERGMILLER, G.G. **Lean manufacturers transcendence to green manufacturing**: correlating the diffusion of lean and green manufacturing systems. 2006. 295f. Thesis (PhD) – College of Engineering, University of South Florida Scholar Commons, Florida, 2006.
- BHASIN, S.; BURCHER, P. Lean viewed as a philosophy. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v.17, n.1, p.56-72, 2006.

BIFFI, M. **Desenvolvimento do processo de retificação com alta velocidade em sede de válvulas de motores à combustão interna usando rebolo de CBN vitrificado**. 2003.

123f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo., São Carlos, 2003.

BILES, W.E. Environmentally benign manufacturing. In: KUTZ, M. **Environmentally conscious manufacturing**. Hoboken: John Wiley, 2007.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental** – o desafio do desenvolvimento sustentável. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

BRASIL. **Lei nº 12.305/10, política nacional de resíduos sólidos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2010.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Secretaria do Desenvolvimento da Produção. **Anuário estatístico 2012**. Brasília: SDP, 2012.

BREZET, J.C.; HEMEL, C.G. **Ecodesign**: a promising approach to sustainable production and consumption. Paris: UNEP, 1997.

BUENO, C. et al. Metodologias de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV): discussão comparativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS E SERVIÇOS, 3., 2012, Maringá. **Anais...** Maringá: [s.d.], 2012. CD-ROM.

CARVALHO, A. et al. From a literature review to a framework for environmental process impact assessment index. **Journal of Cleaner Production**, v.64, p.36–62, 2014.

CANADA STATISTICS. **Human activity and the environment**: waste management in Canada. Statistics Canada – Environment Accounts and Statistics, 2012. Disponível em: <<http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/16-201-x2012000-eng.pdf>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

CARPINETTI, L.C.R. **Gestão da qualidade**: conceitos e técnicas. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2012.

CERINŠEK, G.; ABBAS, S.P.; HEIKURA, T. Contextually enriched competence model in the field of sustainable manufacturing for simulation style technology enhanced learning environments. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.24, p.441–455, 2013.

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P.T. **Diálogos setoriais Brasil e União Europeia**: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil. Brasília: IBICT, 2015.

CHESTER, C. et al. Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals. **Environmental Research Letters**, v.8, p.1-10, 2013.

CHOMPU-INWAI, R.; JAIMJIT, B.; PREMSURUYANYNT, P. A Combination of material flow cost accounting and design of experiments techniques in an SME: the case of a wood products manufacturing company in northern Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v.108, Part B, p.1352-1364, 2015.

CLARENS, A.F. **Carbon dioxide based metalworking fluids**. 2008. 179f. Thesis (PhD) – University of Michigan, Michigan, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Uso da água no setor industrial brasileiro: matriz de coeficientes técnicos. In: _____. **Encontro da indústria para a sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012a. (Cadernos Setoriais Rio + 20).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Diversificação e diferenciais sustentáveis da matriz elétrica brasileira. In: _____. **Encontro da indústria para a sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012b. (Cadernos Setoriais Rio + 20).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Avanços da indústria brasileira rumo ao desenvolvimento sustentável: síntese dos fascículos setoriais. In: _____. **Encontro da indústria para a sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012c. (Cadernos Setoriais Rio + 20).

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Visão da indústria brasileira sobre a gestão de resíduos sólidos**. Brasília: Gerência Executiva de Meio Ambiente e Sustentabilidade, 2014.

CURKOVIC, S. Environmentally responsible manufacturing: the development and validation of a measurement model. **European Journal of Operational Research**, v.146, n.1, p.130–155, 2003.

CURI, D. **Gestão ambiental**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

DAHMUS, J.B.; GUTOWSKI, T.G. An Environmental analysis of machining. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING AND RD&D EXPO, 2004, Anaheim. **Proceedings...** Anaheim: ASME, 2004. p.643-665.

DEIF, A.M. A System model for green manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v.19, n.14, p.1553–1559, 2011.

DESPEISSE, M. et al. Industrial ecology at factory level: a prototype methodology. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: journal of engineering manufacture**, v.226, n.10, p.1648–1664, 2012a.

DESPEISSE, M. et al. Industrial ecology at factory level – a conceptual model. **Journal of Cleaner Production**, v.31, p.30–39, 2012b.

DIAZ, N. et al. Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE SYSTEMS AND TECHNOLOGY, 2010, Arlington. **Proceedings...** Arlington: IEEE, 2010. p.1-6.

DILWORTH, J.B. **Operations management design, planning, and control for manufacturing and services**. New York: McGraw-Hill Education, 1992.

DORNFELD, D. A. Moving towards green and sustainable manufacturing. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v.1, n.1, p. 63–66, 2014.

- DORNFELD, D.A. et al. Introduction to green manufacturing. In: DORNFELD, D.A. **Green manufacturing: fundamentals and applications**. Berkeley: Springer, 2013.
- D'SOUZA, C. et al. Green decisions: demographics and consumer understanding of environmental labels. **International Journal of Consumer Studies**, v.31, n.4, p.371-376, 2007.
- DUARTE, S.; CRUZ-MACHADO, V. Modelling lean and green: a review from business models. **International Journal of Lean Six Sigma**, v.4, n.3, p.1–23, 2009.
- DUFLOU, J.R.; KELLENS, K.; DEWULF, W. Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: a state of the art. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v.4, n.2, p.129–135, 2011.
- DUFLOU, J.R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: a processes and systems approach. **CIRP Annals - manufacturing technology**, v. 61, n. 2, p. 587–609, 2012.
- EARLHAM COLLEGE. **Carcinogens, mutagens and teratogens**. Chemical hygiene and safety, online safety training. 2014. Disponível em: <<https://www.earlham.edu/chemical-hygiene-and-safety/online-safety-training/student-worker-safety-training/carcinogens,-mutagens-and-teratogens/>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.
- EASTWOOD, M.D.; HAAPALA, K.R. A Unit process model based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v.108, part A, p.54-64, 2015.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota técnica DEA 14/10** - avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019). Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2010. (Série Estudos da Demanda).
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual energy review 2011**. 2011. Disponível em: <<http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/aer.pdf>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.
- ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATIONS. **Introduction, intended uses and key programme elements for environmental product declarations, EPD**. Stockholm: The International EPD Cooperation, 2008.
- EUROPEAN COMMISSION. **Critical raw materials for the EU**. Report of the ad-hoc working group on defining critical raw materials. Brussel: Raw Materials Supply Group, 2010.
- EUROPEAN COMMISSION. Joint Research Council. International Institute for Environment Sustainability. **International reference life cycle data system (ILCD) Handbook**. Luxembourg: European Commission. Joint Research Council. Institute for Environmental and Sustainability, 2010a.
- EUROPEAN COMMISSION. **International reference life cycle data system (ILCD) handbook: framework and requirements for LCIA models and indicators**. Luxembourg:

European Commission. Joint Research Council. Institute for Environment and Sustainability, 2010b.

FERRAZ JUNIOR, F. et al. Supervisão remota da usinagem com o padrão MTConnect. **Máquinas e Metais**, v.48, n.445, p.114-131, 2012.

FILLETI, R.A.P. **Modelo dinâmico de inventário de ciclo de vida (ICV) de processo unitário discreto de manufatura**: um estudo de caso com retificação cilíndrica externa. 2015. 130f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

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.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v.91, n.1, p.1–21, 2009.

FLORIDA, R. Lean and green: the move to environmentally conscious manufacturing. **California Management Review**, v.39, p.80-105, 1996.

FORESIGHT. **The Future of manufacturing**: a new era of opportunity and challenge for the UK project report. London: The Government Office for Science, 2013.

FRISCHKNECHT, R.; STEINER, R.; JUNGBLUTH, N. **The Ecological scarcity method eco-factors 2006**. A method for impact assessment in LCA. Switzerland: Federal Office for the Environment, 2009.

GABARRELL, X. et al. The Effects of using diferente mix of energy sources in the generation of electricity in Europe. In: BIENNIAL INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN ENERGY STUDIES, 7., 2010, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: [s.n.], 2010.

GARBIE, I.H. An Analytical technique to model and assess sustainable development index in manufacturing enterprises. **International Journal of Production Research**, v.52, n.16, p.1–40, 2014.

GARCIA, R.P. **Avaliação comparativa de instrumentos de gestão ambiental do ciclo de vida aplicados a dois sistemas com biomassa**: painéis e eletricidade. 2010. 113f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra., Coimbra, 2010.

GARETTI, M.; TAISCH, M. Sustainable manufacturing: trends and research challenges. **Production Planning & Control: the management of operations**, v.23, n.2-3, p.83–104, 2012.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GOEDKOOP, M.; EFFTING, S.; COLLIGNON, M. **The ecoindicator99**: a damage orientated method for life cycle impact assessment. Manual for designers. Amerfoort: PreConsultants B.V., 2000.

GOEDKOOPE, M. et al. **ReCiPe 2008** – a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation. [S.l.:s.n.], 2009.

GROEN, E.A. et al. Sensitivity analysis in life cycle assessment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ASSESSMENT IN THE AGRI-FOOD SECTOR, 9., 2014, São Francisco. **Proceedings...** São Francisco: [s.n.], 2014.

GROOVER, M.P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing**. 3th ed. New York: Prentice Hall, 2007.

GUINÉE, J.B. **Life cycle assessment**: an operational guide to the ISO standards. LCA in perspective – operational annex to guide. Netherlands: Centre for Environmental Science, Leiden University, 2001.

GUINÉE, J.B. et al. Life cycle assessment: past, present, and future. **Environmental Science & Technology**, v.45, n.1, p.90-96, 2011.

GUNGOR, A.; GUPTA, S.M. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. **Computers & Industrial Engineering**, v. 36, n. 4, p. 811-853, 1999.

GUTOWSKI, T. et al. Environmentally benign manufacturing: observations from Japan, Europe and the United States. **Journal of Cleaner Production**, v.13, n.1, p.1–17, 2005.

GUTOWSKI, T.; DAHMUS, J.; THIRIEZ, A. Electrical energy requirements for manufacturing processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING, 13., 2006, Leuven. **Proceedings...** Leuven: [s.n.], 2006.

GUTOWSKI, T.G. Design and manufacturing for environment. In: GROTE, K.H.; ANTONSSON, E.K. **Handbook of mechanical engineering**. New York: Springer, 2004.

HAUSCHILD, M.Z.; POTTING, J. **Spatial differentiation in life cycle impact assessment** – the EDIP2003 methodology. Copenhagen: Guidelines from the danish environmental protection agency, 2005. (Environmental News, n.80).

HAUSCHILD, M.Z.; JESWIET, J.; ALTING, L. From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives. **Annals of the CIRP**, v.54, n.2, p.535-554, 2005.

HAUSCHILD, M.Z. et al. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.18, n.3, p.683-697, 2013.

HEIJUNGS, R. et al. **Environmental life cycle assessment of products**: guide and backgrounds (part 1). Netherlands: Centre for Environmental Science, Leiden University, 1992.

HELU, M.; VIJAYARAGHAVAN, A.; DORNFELD, D. Evaluating the relationship between use phase environmental impacts and manufacturing process precision. **CIRP Annals - manufacturing technology**, v.60, n.1, p.49–52, 2011.

HUNT, R.; FRANKLIN, E. LCA - How it came about. Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n. 1, p. 4-7, 1996.

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.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Switzerland: IPCC, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy technology perspectives 2008: in support of the G8 plan of action, scenarios & strategies to 2050**. France: OECD/IEA, 2008.

_____. **Key world energy statistics**. 2012. Disponível em:<<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

_____. **Key world energy statistics**. 2013. Disponível em:<<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

INTERNATIONAL LABOUR OFFICE. **Global employment trends 2011: the challenge of a jobs recovery**. Geneva: International Labour Office, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental management - life cycle assessment- principles and framework**. Geneva, 2006a.

_____. **ISO 14044: Environmental management - life cycle assessment- requirements and guidelines**. Geneva, 2006b.

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.

ITSUBO, N.; INABA, A. A New LCIA method: LIME has been completed. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, n.5, p.305, 2003.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

JABBOUR, C.J.C. Esverdeando a manufatura: dos fundamentos conceituais ao estudo de múltiplos casos. **Production Journal**, v.25, n.2, p.365-378, 2015.

JACQUEMIN, L.; PONTALIER, P.-Y.; SABLAYROLLES, C. Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.17, p.1028–1041, 2012.

JAIN, S. et al. A Model based continuous improvement methodology for sustainable manufacturing. In: PRABHU, V.; TAISCH, M.; KIRITSIS, D. **Advances in production management systems**. Sustainable production and service supply chains. State College: Springer, 2013.

JAWAHIR, I.S. et al. **Total life-cycle considerations in product design for manufacture:** a framework for comprehensive evaluation, (keynote paper), Proc. TMT 2006, Lloret de Mar. Spain: Barcelona, 2006.

JESWIET, J.; KARA, S. Carbon emissions and CESTM in manufacturing. **CIRP Annals - manufacturing technology**, v.57, n.1, p.17–20, 2008.

JIANG, Z.; ZHANG, H.; SUTHERLAND, J.W. Development of an environmental performance assessment method for manufacturing process plans. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.58, n.5/8, p.783–790, 2012.

JIN, Y.; NOH, S.D. Stochastic model-based framework for assessment of sustainable manufacturing technology. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v.15, n.3, p.519–525, 2014.

JOLLIET, O. et al. Impact 2002+: a new Life cycle impact assessment methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, n.6, p.324–330, 2003.

JOUNG, C.B. et al. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. **Ecological Indicators**, v.24, p.148–157, 2012.

JOVANE, F. et al. (2008). The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 57, p. 641–659.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing engineering and technology**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

KEINAN, A.; CLARCK, A.G. Recent explosive human population growth has resulted in an excess of rare genetic variants. **Science**, v.336, n.6082, p.740–743, 2012.

KELLENS, K. **Energy and resource efficient manufacturing** – unit process analysis optimization. 2013. 249f. Thesis (PhD) – Faculty of Engineering Science, Bélgica. 2013.

KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: methodology description. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.17, n.1, p.69–78, 2012a.

KELLENS, K. et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! Initiative (cooperative

effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.17, n.2, p.242–251, 2012b.

KIM, B.R.; KALIS, E.M.; ADAMS, J.A. Integrated emissions management for automotive painting operations. **Pure and Applied Chemistry**, v.73, n.8, p.1277-1280, 2001.

KIM, D.B. et al. A Decision-guidance framework for sustainability performance analysis of manufacturing processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.78, n.9, p.1455-1471, 2015.

KIM, Y-J. et al. Eco-friendly manufacturing strategies for simultaneous consideration between productivity and environmental performances: a case study on a printed circuit board manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v.67, p.249-257, 2013.

KING, A.A.; LENOX, M.J. Lean and green? An empirical examination of the relationship between lean production and environmental performance. **Production and Operations Management**, v.10, p.244-256, 2001.

KUNZIG, R. População mundial: já somos 7 bilhões. **National Geographic Brasil**, v.11, n.130, 2011.

LARREINA, J. et al. Smart manufacturing execution system (SMES): the possibilities of evaluating the sustainability of a production process. In: GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE MANUFACTURING. 11., 2013, Berlin. **Anais...** Berlin: [s.n.], 2013.

LEE, J.Y.; LEE, Y.T. A Framework for a research inventory of sustainability assessment in manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v.79, p.207-218, 2014.

LEE, J.Y.; KANG, H.S.; NOH, S. MAS2: an integrated modeling and simulation-based life cycle evaluation approach for sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v.66, p.146–163, 2014.

LI, C. et al. AHP based SWOT analysis for green manufacturing strategy selection. **Key Engineering Materials**, v.431/432, p.249–252, 2010a.

LI, C. et al. A Methodology for selecting a green technology portfolio based on synergy. **International Journal of Production Research**, v.48, n.24, p.7289–7302, 2010b.

LINKE, B.; OVERCASH, M. Life cycle analysis of grinding. In: DORNFELD, D.A.; LINKE, B.S. **Leveraging technology for a sustainable world**. Berkeley: Springer, 2012.

LINKE, B.; HUANG, Y.-C.; DORNFELD, D. Establishing greener products and manufacturing processes. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v.13, n.7, p.1029–1036, 2012.

MANUFUTURE: a vision for 2020 - assuring the future of manufacturing in Europe. Belgium: European Commission, 2004. (Report of the high-level group – November 2004).

MARINESCU, I.D. et al. **Handbook of machining with grinding wheels**. Abingdon: Taylor & Francis, 2007.

McKERLIE, K.; KNIGHT, N.; THORPE, B. Advancing extended producer responsibility in Canada. **Journal of Cleaner Production**, v.14, n.6/7, p.616–628, 2006.

MENDELSON, R.; MULLER, N. Measuring the damages of air pollution in the United States. **Journal of Environmental Economics and Management**, v.54, n.1, p.1-14, 2007.

MERCHANT, M.E.; DORNFELD, D.; WRIGHT, P.K. **Manufacturing - its evolution and future**. Berkeley: Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory for Manufacturing and Sustainability, 2005.

MICALES, J.A.; SKOG, K.E. The Decomposition of forest products in landfills. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.39, n.2/3, p.145-158, 1997.

MITTAL, V.K.; SANGWAN, K.S. Assessment of hierarchy and inter-relationships of barriers to environmentally conscious manufacturing adoption. **World Journal of Science, Technology and Sustainable Development**, v.10, n.4, p.297-307, 2011.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiment**. 6thed. Arizona: John Wiley, 2005.

MORAES, D.S.L.; JORDÃO, B.Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista Saúde Pública**, v.36, n.3, p.370-374, 2002.

MORITA, D.M. **Prevenção e controle da poluição da água e do solo causada por resíduos industriais perigosos**. 2010. 557f. (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MURRAY, V.R.; ZHAO, F.; SUTHERLAND, J.W. Life cycle analysis of grinding: a case study of non-cylindrical computer numerical control grinding via a unit-process life cycle inventory approach. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: journal of engineering manufacture**, v.226, n.10, p.1604–1611, 2012.

NARITA, H.; KAWAMURA, H.; NORIHISA, T. Development of prediction system for environmental burden for machine tool operation (1st report, proposal of calculation, method for environmental burden). **JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing**, v.49, n.4, p.1188–1195, 2006.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **Overview of the sustainable manufacturing**. Disponível em: <<http://www.mel.nist.gov/msid/SSP/introduction/manufacturing.html#2>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **U.S. Life cycle inventory database**. Colorado: Slack Wax, 2009.

NAZAROFF, W.W.; COHEN, L.A. **Environmental engineering science**. New York: Wiley, 2001.

OMETTO, A.R.; HAUSCHILD, M.Z.; ROMA, W.N.L. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.14, n.3, p.236-247, 2009.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Measuring material flows and resource productivity**. Paris: OECD, 2008. (OECD Work programme on material flows (MF) and resource productivity (RP), Synthesis report).

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. Directorate for Science Technology and Industry. **OECD Sustainable manufacturing toolkit: seven steps to environmental excellence**. Paris: OECD Green Growth Strategy, 2011.

OVERCASH, M.; TWOMEY, J.; ISAACS, J. Manufacturing unit process life cycle inventories (UPLCI). In: WORKSHOP ON PERFORMANCE METRICS FOR INTELLIGENT SYSTEMS. 9., 2009, Gaithersburg. **Proceedings...** Gaithersburg: [s.n.], 2009. p.30-31.

PAMPANELLI, A.B.; FOUND, P.; BERNARDES, A.M. A Lean & green model for a production cell. **Journal of Cleaner Production**, v.85, n.15, p.19-30, 2013.

PARK, S.H.; LABYS, W.C. **Industrial development and environmental degradation: a source book in the origins of global pollution**. Cheltenham: Edward Elgar, 1998.

PE INTERNATIONAL. **Thinkstep: GaBi software-system and databases for life cycle engineering**. GaBi data on demand database 2014. BR: diesel at refinery. Leinfelden-Echterdingen, 2015a.

_____. **Thinkstep: GaBi software-system and databases for life cycle engineering**. GaBi extension database II: energy 2014. BR: sulphur (elemental) at refinery. Leinfelden-Echterdingen, 2015b.

_____. **Thinkstep: GaBi software-system and databases for life cycle engineering**. GaBi extension database III: iron and steel 2014. GLO: steel rebar worldsteel. Leinfelden-Echterdingen, 2015c.

_____. **Thinkstep: GaBi software-system and databases for life cycle engineering**. GaBi extension database XIII: ecoinvent integrated 2014. GLO: cast iron production. Leinfelden-Echterdingen, 2015d.

_____. **Thinkstep: GaBi software-system and databases for life cycle engineering**. GaBi extension database XIII: ecoinvent integrated 2014. GLO: pump production. Leinfelden-Echterdingen, 2015e.

_____. **Thinkstep: GaBi software-system and databases for life cycle engineering**. GaBi professional database 2014. BR: electricity grid mix. Leinfelden-Echterdingen, 2015f.

_____. **Thinkstep: GaBi software-system and databases for life cycle engineering**. GaBi professional database 2014. BR: gasoline mix (regular) at refinery PE. Leinfelden-Echterdingen, 2015g.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. BR: heavy fuel oil at refinery (1.0 wt.% S). Leinfelden-Echterdingen, 2015h.

PE INTERNATIONAL. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. DE: consumption automotive part PE. Leinfelden-Echterdingen, 2015i.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. EU-25: corrugated board boxes. Leinfelden-Echterdingen, 2015j.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. EU-27: aluminium ingot mix. Leinfelden-Echterdingen, 2015k.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. EU-27: lubricants at refinery. Leinfelden-Echterdingen, 2015l.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. EU-27: tap water. Leinfelden-Echterdingen, 2015m.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. GLO: silicon mix (99%). Leinfelden-Echterdingen, 2015n.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. RER: polypropylene granulate (PP). Leinfelden-Echterdingen, 2015o.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. RER: stainless steel – cold rolled coil. Leinfelden-Echterdingen, 2015p.

_____. **Thinkstep:** GaBi software-system and databases for life cycle engineering. GaBi professional database 2014. ZA: ferro manganese. Leinfelden-Echterdingen, 2015q.

PERENIUS, L. **Global chemical industry: profile and trends.** Global outlook for chemicals and waste. Geneva: UNEP, 2009. Disponível em: <http://www.chem.unep.ch/unepsa/cm/mainstreaming/Documents/GCO_SteerComm1/LenaPerenius_Assessment%20of%20Key%20Resources.pdf>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

PRÜSS-ÜSTÜN, A.; CORVALÁN, C. **Preventing disease through healthy environments.** Towards an estimate of the environmental burden of disease. Geneva: World Health Organization, 2006.

PUSAVEC, F.; KRAJNÍK, P.; KOPAC, J. Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner Production**, v.18, n.2, p.174–184, 2010.

RAHIMIFARD, S. et al. Ho to manufacture a sustainable future for 9 billion people in 2050. In: INTERNATIONAL CIRP CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING, 20., 2013, Singapore. **Proceedings...** Singapore: [S.N.], 2013.

RAO, P.N. Sustainable manufacturing - principles, applications and directions. In: NATIONAL CONVENTIONAL OF PRODUCTION ENGINEERS & NATIONAL SIMINAR ON ADVANCEMENTS IN PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT, 28., 2013, Jaipur. **Proceedings...** Jaipur: [S.N.], 2013.

REHMAN, M.A.A.; SHRIVASTAVA, R.R.; SHRIVASTAVA, R.L. Validating green manufacturing (GM) framework for sustainable development in an Indian steel industry. **Universal Journal of Mechanical Engineering**, v.1, n.2, p.49–61, 2013.

REICH-WEISER, C. et al. Metrics for green manufacturing. In: DORNFELD, D.A. **Green manufacturing: fundamentals and applications**. Berkeley: Springer, 2013.

RIBEIRO, P.H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados**. 2009. 343f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROSENBAUM, R.K. et al. USEtox — the UNEP/SETAC-consensus model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.13, n.7, p.532–546, 2008.

RUSINKO, C.A. Green manufacturing: an evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v.54, n.3, p.445–454, 2007.

SAMPATTAGUL, S. et al. LCA-NETS tool for environmental design of natural gas-fired power generation systems in Thailand. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTALLY CONSCIOUS DESIGN AND INVERSE MANUFACTURING, 3., 2003, Tokyo. **Proceedings...** Canada: IEEE, 2003.

SANTOS, J.P. et al. Improving the environmental performance of machine-tools: influence of technology and throughput on the electrical energy consumption of a press-brake. **Journal of Cleaner Production**, v.19, n.4, p.356–364, 2011.

SARKIS, J. A Methodological framework for evaluating environmentally conscious manufacturing programs. **Computers & Chemical Engineering**, v.36, p.793–810, 1999.

SEIDEL, M. et al. Overcoming barriers to implementing environmentally benign manufacturing practices – strategic tools for SMEs. **Environmental Quality Management**, v.18, n.3, p.37-55, 2009.

SELBORNE, L. **A Ética no uso da água doce: um levantamento**. Brasília: UNESCO, 2001.

SHAO, G.; KIBIRA, D. Decision support for sustainable manufacturing using decision guidance query language. **International Journal of Sustainable Engineering**, v.4, n.3, p.251–265, 2010.

SHIN, S.-J. et al. Process-oriented life cycle assessment framework for environmentally conscious manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, p.1-19, 2015.

SILVA, D.A.L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. 207p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, D.A.L.; MASONI, P. **Critical analysis of the main international management, use and maintenance LCI database policies**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2016. Disponível em: <http://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/03/Presentation_V1.pdf> Acesso em: 25 Mai. 2016.

SILVA, D.A.L.; OMETTO, A.R.; SILVA, E.J. (2016). Green manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro. **Production Journal**. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.032513>.

SILVA, D.A.L. et al. Quality tools applied to cleaner production programs: a first approach toward a new methodology. **Journal of Cleaner Production**, v.47, p.174-187, 2013a.

_____. Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.18, n.7, p.1404-1411, 2013b.

_____. Application of life cycle assessment (LCA) and design of experiments (DOE) to the monitoring and control of a grinding process. **Procedia CIRP**, v.29, p.508-513, 2015a.

_____. How life cycle management can be worked with green manufacturing? A critical literature review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE MANAGEMENT, 7., 2015, Bordeaux. **Proceedings...** Bordeaux: [s.n.], 2015b.

SILVA, E.J. et al. Web based supervisory system for plunge grinding operation. In: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 21., 2011, Natal. **Proceedings...** Natal: ABCM, 2011. p.859-868.

SILVA, P.R.S.; AMARAL, F.G. An Integrated methodology for environmental impacts and costs evaluation in industrial processes. **Journal of Cleaner Production**, v.17, n.15, p.1339-1350, 2009.

SISTEMA DE INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA – SICV Brasil. Metodologia padrão para elaboração de inventários de ciclo de vida da indústria brasileira – documento consolidado. Brasília: IBICIT/MCT, 2009. Projeto Brasileiro de Inventários do Ciclo de Vida.

SMITH, L.; BALL, P. Steps towards sustainable manufacturing through modelling material, energy and waste flows. **International Journal of Production Economics**, v.140, n.1, p.227-238, 2012.

SPROEDT, A. et al. A Simulation-based decision support for eco-efficiency improvements in production systems. **Journal of Cleaner Production**, v.105, p.389-405, 2015.

STEEN, B. **A Systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS)**. Göteborg: Chalmers University of Technology, 1999. (CPM Report 1999:5).

SUBIC, A. et al. Performance analysis of the capability assessment tool for sustainable manufacturing. **Sustainability**, v.5, n.8, p.3543–3561, 2013.

SUSTAINABLE MANUFACTURING INITIATIVE. **What does sustainable manufacturing mean to Australia?** The CSIRO Future Manufacturing Flagship, 2011.

TAGUE, N.R. **The Quality toolbox**. Milwaukee: ASQ Quality, 2004.

TAN, X.; LIU, D.; LI, C. A Decision-making framework model of cutting tools selection for green manufacturing and its application. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v.7, n.2, p.257–260, 2008.

THE GREEN GRID. **Data center life cycle assessment guidelines**. White Paper #45, v2, 2012. Disponível em: <<http://www.thegreengrid.org/en/Global/Content/white-papers/WP45-DataCentreLifeCycleAssessmentGuideline>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

THORN, M.J.; KRAUS, J.L.; PARKER, D.R. Life-cycle assessment as a sustainability management tool: strengths, weaknesses, and other considerations. **Environmental Quality Management**, v.20, n.3, p.1–10, 2011.

TOFFOLETTO, L. et al. LUCAS e a new LCIA method used for a Canadian-specific context. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.12, n.2, p.93-102, 2007.

TSAI, W.-H. et al. A Product-mix decision model using green manufacturing technologies under activity-based costing. **Journal of Cleaner Production**, v.57, p.178-187, 2013.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Evaluation of environmental impacts in LCA**. Paris: UNEP, 2003.

_____. **Life cycle management - a business guide to sustainability**. Paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2007.

_____. **Assessing the environmental impacts of consumption and production: priority products and materials**. Nairóbi: UNEP, 2010.

_____. **Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication**. International panel for sustainable management. Nairóbi: UNEP, 2011.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. **International yearbook of industrial statistics 2010**. Viena: UNIDO, 2010.

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION. International standard industrial classification of all economic activities (ISIC), rev.4. Detailed structure and explanatory notes. 2014. Disponível em: <<https://unstats.un.org/unsd/cr/registry/regcst.asp?Cl=27&Lg=1>>. Acesso em: 25 Dec. 2014.

UNITED NATIONS WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future (Brundtland Report)**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. **How does commerce define sustainable manufacturing?** International trade administration. 2010. Disponível em:<http://www.trade.gov/competitiveness/sustainablemanufacturing/how_doc_defines_SM.asp>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual energy outlook 2013 early release overview**. Disponível em:<[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/pdf/0383er\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/er/pdf/0383er(2013).pdf)>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Toxic release inventory (TRI): chemical report**. TRI explorer. 2008. Disponível em:<http://iaspub.epa.gov/triexplorer/tri_release.chemical>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

VAN-CAMP, L. et al. **Reports of the technical working groups established under the thematic strategy for soil protection**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. (EUR 21319 EN/4).

VENTURA, R. **Mudanças no perfil de consumo no Brasil**: principais tendências nos próximos 20 anos. Rio de Janeiro: Macroplan – Prospectiva, Estratégia & Gestão, 2009.

VIJAYARAGHAVAN, A.; HELU, M. Enabling technologies for assuring green manufacturing. In: DORNFELD, D.A. **Green manufacturing**: fundamentals and applications. Berkeley: Springer, 2013.

VIJAYARAGHAVAN, A. et al. Closed-loop production systems. In: DORNFELD, D.A. **Green manufacturing**: fundamentals and applications. Berkeley: Springer, 2013.

VIKHOREV, K.; GREENOUGH, R.; BROWN, N. An Advanced energy management framework to promote energy awareness. **Journal of Cleaner Production**, v.43, p.103–112, 2013.

WAN, Y.; JIANGUO, Q. Long-term development trend of China's economy and importance of the circular economy. **China & World Economy**, v.13, n.2, p.16-25, 2005.

WATER RESOURCES GROUP. **Charting our water future**. Nova Iorque: McKinsey, 2009.

WEINERT, K. Dry machining and minimum quantity lubrication (MQL). In: CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE CUTTING, 2004, Aachen. **Proceedings...** Aachen: [s.n.], 2004.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.Z.; ALTING, A. Environmental assessment of products. Methodology, tools and case studies in product development. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997. v.1.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Eco-efficiency learning module**. Disponível em:<<http://www.wbcsd.org/pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=13593&NoSearchContextKey=true>>. Acesso em: 25 Aug. 2014.

WARSEN, J.; KRINKE, S. The Life cycle approach at Volkswagen. **AZT Worldwide**, v.114, p.4–9, 2012.

YAN, H.E.; FEI, L.I.U. Methods for integrating energy consumption and environmental impact considerations into production operation of machining processes. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v.23, p.1–8, 2010.

YAN, H.E.; FEI, L.I.U.; JINLIANG, S.H.I. A Framework of scheduling models in machining workshop for green manufacturing. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v.7, n.2, p.319–322, 2008.

YIN, R.K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. São Paulo: Bookman, 2005.

YUAN, C.Y. et al. A Decision-based analysis of compressed air usage patterns in automotive manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v.25, n.4, p.293–300, 2006.

ZENDOIA, J. et al. A Specific method for the life cycle inventory of machine tools and its demonstration with two manufacturing case studies. **Journal of Cleaner Production**, v.78, p.139–151, 2014.

ZHANG, H.; CALVO-AMODIO, J.; HAAPALA, K.R. A Conceptual model for assisting sustainable manufacturing through system dynamics. **Journal of Manufacturing Systems**, v.32, n.4, p.543–549, 2013.

ZHAO, W.-B. et al. Energy simulation framework integrated with green manufacturing-enabled PLM information model. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v.2, n.3, p.217–224, 2015.

APÊNDICE A – Protocolo para realização dos estudos de caso

Para Yin (2005), o protocolo para o estudo de caso contém o instrumento de coleta de dados, bem como os procedimentos e regras gerais que devem ser seguidas ao utilizar o instrumento. O protocolo utilizado nesta tese é apresentado no Quadro 43.

A. Introdução ao estudo de caso	
<i>A1. Objetivo do protocolo</i>	Guiar a execução do teste prático do procedimento de <i>GM</i> desenvolvido e apresentado na seção 4.1.2.
B. Procedimentos da coleta de dados	
<i>B1. Locais a serem visitados</i>	<p>Identificação das indústrias visitadas, incluindo pessoas de contato. Por questões de sigilo, os nomes das empresas e pessoas envolvidas foram preservados. Todas as indústrias participantes desta pesquisa estão localizadas no Estado de São Paulo, e maiores detalhes sobre elas constam ao longo da seção 4.2.</p> <p>Uma Carta de Apresentação foi encaminhada previamente a cada indústria no início da pesquisa (ver modelo no Apêndice B).</p>
<i>B2. Cronograma de atividades</i>	<p>Depois de firmada a parceria com as indústrias, um cronograma de atividades foi montado para cada empresa a ser visitada. Para cada empresa foram planejadas quatro visitas técnicas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - a primeira para apresentação geral do projeto de pesquisa, das necessidades para sua execução e das expectativas de resultados; 2 - uma segunda visita para a coleta de dados conforme o item D.1 deste protocolo; 3 - uma terceira visita para coleta de dados remanescentes e apresentação de resultados parciais do estudo; 4 - uma última visita para apresentação dos resultados consolidados do estudo de caso. <p>Cada visita técnica realizada teve uma duração média de 6 horas.</p>
<i>B3. Fontes e ferramentas de coleta de dados</i>	<p>As fontes e as ferramentas de coleta de dados foram diversas. Porém, a principal fonte de dados foram as entrevistas. As entrevistas foram realizadas com profissionais de diversas áreas de dentro das empresas visitadas, como engenheiros ou supervisores de processo, gerentes industriais, engenheiros de meio ambiente, engenheiros/analistas de qualidade, e engenheiros de desenvolvimento de produtos. As entrevistas foram realizadas com o intuito de cobrir os tópicos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - a seleção de um produto da empresa para ser estudado com base no procedimento de <i>GM</i> desenvolvido nesta tese; 2 - o mapeamento do processo de fabricação do produto escolhido; 3 - a quantificação dos fluxos diretos de materiais e de energia que entram e que saem do processo de fabricação mapeado; 4 - a consolidação do ICV do produto selecionado tendo em vista a macroetapa de pré-avaliação do procedimento de <i>GM</i> proposto; 5 - o estudo detalhado de algum(uns) dos processos de manufatura mapeados para a realização das macroetapas de avaliação e monitoramento e pós-avaliação do procedimento de <i>GM</i>.

	<p>Outras fontes de dados auxiliares às entrevistas foram as análises documentais, e as observações diretas do pesquisador. As análises de documentos foram importantes para cobrir os tópicos 3, 4, e 5 acima citados. Os documentos foram especificações técnicas de produtos e insumos, histórico de consumo de recursos e de geração e gestão de resíduos na fábrica, e fluxogramas de processo.</p> <p>Como ferramentas para a coleta e processamento de dados, foi montado um questionário panorama para guiar as entrevistas, o qual é mostrado no Apêndice C para guiar a macroetapa de pré-avaliação. No Apêndice D, foi elaborada uma ferramenta específica para utilização durante a Etapa 4 do procedimento de <i>GM</i> desenvolvido. Já no Apêndice E, foi elaborado um questionário para coleta de dados durante a execução das macroetapas de avaliação e monitoramento e durante a pós-avaliação.</p>
C. Esboço do relatório do estudo de caso	
<i>C1. Resultados obtidos com a prática</i>	<p>O principal resultado dos estudos de caso foi a identificação dos processos de manufatura ambientalmente mais relevantes para o ciclo de vida dos produtos estudados. De posse desses resultados, foi realizada a pesquisa experimental da seção 3.2.3.</p> <p>O formato final dos relatórios dos estudos de caso consta neste documento ao longo da seção 4.2.</p>
D. Questões do estudo de caso	
<i>D1. Questões iniciais</i>	No Apêndice C , consta a lista completa com todas as questões formuladas. Estas questões serviram para guiar a macroetapa de pré-avaliação do procedimento de <i>GM</i> .
<i>D2. Questões avançadas</i>	<p>Aqui foram realizadas as seguintes questões:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - Quais são os parâmetros de processo relevantes para o(s) processo(s) de manufatura escolhido(s)? 2 - Quais são os RTQP afetados pelo processo(s) de manufatura escolhido(s)? 3 - Quais são os aspectos e os impactos ambientais importantes de serem monitorados no processo(s) de manufatura escolhido(s)? 4 - Como que o processo(s) de manufatura escolhido(s) pode ser estratificado em nível de suas subunidades existentes? 5 - Quais são os modos de operação existentes no processo(s) de manufatura escolhido(s)? <p>Estas questões foram importantes para permitir a realização das macroetapas de avaliação e monitoramento e a pós-avaliação do procedimento de <i>GM</i> desenvolvido.</p> <p>Em relação ao cronograma de atividades abordado no item B2 deste protocolo, essas questões foram feitas durante a coleta de dados na terceira visita técnica em cada indústria de manufatura, utilizando para isso o questionário do Apêndice E.</p>

Quadro 43– Protocolo de coleta de dados utilizado nesta tese

Fonte: adaptado de Yin (2005)

APÊNDICE B – Modelo de carta de apresentação utilizada nos estudos de caso

A empresa XXXXXXXX.

São Carlos/SP – XX de Fevereiro de 2015

Assunto: Pedido de apoio para realização de trabalho de Doutorado.

Por meio da proposta aqui representada pelo **Eng. Diogo Aparecido Lopes Silva**, atualmente aluno regular do programa de pós-graduação em Doutorado, no curso de Engenharia de Produção na Universidade de São Paulo, campus de São Carlos; e representada pelo orientador **Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto**, e coorientador **Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva**, respeitosamente solicitamos apoio, nos termos que seguem, para realização do Projeto de Pesquisa intitulado: **Gestão do ciclo de vida de produtos por meio da avaliação e do monitoramento ambiental de processos de manufatura: procedimento e estudos de caso.**

A ajuda que necessitamos diz respeito à disponibilização de dados referentes ao processo de fabricação de um produto produzido pela empresa. Estes dados seriam coletados em visitas técnicas e/ou em entrevistas com pessoa específica ou grupo de pessoas da empresa, na atribuição de transmitir as informações solicitadas. Ressaltamos que a coleta de dados se baseia na obtenção de informações como:

- **Seleção do produto a ser estudado.** É necessário inicialmente que seja definido um produto. Então, para o produto escolhido necessitaremos conhecer suas características (e.g., propriedades físico-mecânicas, durabilidade, vida útil, e forma de uso e descarte do produto).
- Para o produto escolhido, o próximo passo será o **mapeamento do seu processo de fabricação**, desde a entrada de insumos e matérias-primas, até a saída do produto final, devendo ser identificados todos os processos de manufatura envolvidos.
- Posteriormente, para o processo de fabricação mapeado, será necessário coletar dados sobre o **consumo de materiais, energia, e subprodutos/resíduos** relacionados ao processo fabricação do produto para cada etapa de manufatura mapeada.

Não existe o intuito de entrar no mérito de práticas específicas e sigilosas da empresa.

Uma vez deferida esta solicitação e realizada a colaboração para a concretização deste projeto de pesquisa, como **benefícios** que a empresa poderá obter listamos:

- Disponibilização de dados relacionados ao desempenho ambiental do produto estudado em todas as etapas de seu ciclo de vida: manufatura, uso, fim de vida;
- Identificação de eventuais oportunidades para melhorar os aspectos ambientais do produto estudado. Essas informações podem ser importantes, principalmente para a área de Desenvolvimento de Produtos da empresa;
- Seleção de eventuais indicadores ambientais incluindo técnicas de medição, sendo uma contribuição importante para o Sistema de Gestão Ambiental (SGA) da empresa;
- Contribuições para a ecoeficiência e melhoria continuada do produto e do processo de fabricação, especialmente, quanto ao desempenho ambiental.

Se julgar necessário, podemos realizar contato, por exemplo, via telefone ou internet, para esclarecer melhor a estrutura de funcionamento e benefícios previstos com a realização deste trabalho. Por favor, se for este o caso, **não existe em solicitar este contato pessoal de comunicação.**

Desde já agradecemos e ficamos à disposição para o caso de dúvidas.

Atenciosamente,

Diogo Aparecido Lopes Silva
Departamento de Engenharia de Produção
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
diogo@sc.usp.br
Tel: +55 15 9812-7843

Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto
Departamento de Engenharia de Produção
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
aometto@sc.usp.br
Tel: +55 16 3373-8608

Prof. Dr. Eraldo Jannone da Silva
Departamento de Engenharia de Produção
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
eraldojs@sc.usp.br
Tel: +55 16 3373-8645

APÊNDICE C – Questionário panorama – parte A

As informações coletadas com este questionário serviram para nortear a realização da macroetapa de **pré-avaliação** do procedimento de *GM* proposto nesta tese.

QUESTIONÁRIO PANORAMA**Parte 1: Identificação da empresa visitada**

Data da visita técnica: _____

Empresa: _____ Estado: _____ Cidade: _____

Endereço: _____

Entrevistado(s)/fonte de informação:

Produto(s)
produzido(s): _____

Produção anual do(s) produto(s)
produzido(s): _____

Parte 2: A seleção do produto

- Representatividade (R): participação relativa do produto na receita total da empresa. 1 – baixa participação; 3 – participação intermediária; 5 – alta participação;
- Tendência (T): Qual é a tendência de mercado para o volume de vendas do produto nos próximos 5 anos? 1 – Decair/retirada do mercado; 3 – permanecer no mesmo patamar atual; 5 – acréscimo nas vendas;
- Custo (C): custo de produção do produto (desde aquisição de matérias primas e insumos até a expedição final): 1 – baixo custo; 3 – custo intermediário; 5 – alto custo;
- Meio Ambiente (MA): Impacto ambiental (previamente sabido) que o produto pode gerar em seu ciclo de vida: 1 – baixo impacto; 3 – intermediário; 5 – alto impacto.

	Lista de produtos da indústria	R	T	C	MA	R x T x C x MA	Ordem de prioridades
1.							
2.							
...							

Quadro 44 – Exemplo de matriz para seleção do produto de interesse

Fonte: elaborado pelo autor

Parte 3: Questões gerais orientadas ao produto escolhido

1. Há algum trabalho prévio de ACV já realizado pela empresa para o produto escolhido na **Parte 2** deste questionário? *Se sim, solicitar acesso ao trabalho.*

Resposta:

2. Fora ACV há outros trabalhos de cunho ambiental (e.g., *ecodesign*, P+L) já feitos pela empresa para o produto escolhido na **Parte 2**? *Se sim, solicitar acesso aos trabalhos.*

Resposta:

3. Fluxograma geral dos principais processos envolvidos na manufatura do produto escolhido na **Parte 2**. *Solicitar layout da fábrica para guiar a construção do fluxograma.*

4. Quais são as principais tecnologias aplicadas no processo produtivo do fluxograma da **Questão 3**? *Descrever máquinas e equipamentos industriais, formas/mecanismos de acionamento e controle de cada processo, existência de processos de reciclagem/reuso.*

Resposta:

5. Especificações do produto

a) Descrição técnica do produto escolhido e listagem das suas funções desempenhadas. *Solicitar documentos como: desenho técnico do produto, especificação técnica do produto, manual de orientações de uso do produto, cuidados no uso/manuseio do produto.*

Resposta:

b) Quais são os requisitos técnicos de qualidade do produto (RTQP) escolhido, ou seja, as propriedades físicas, químicas e mecânicas do produto e/ou dos seus componentes (densidade, poder calorífico, resistência mecânica, etc.)?

Resposta:

6. Para efeito do estudo de ACV do produto escolhido, definir em conjunto com a empresa visitada a unidade funcional (UF) e o fluxo de referência (FR) do estudo.

Resposta:

7. Como ocorre a distribuição, o uso e o fim de vida do produto após o cumprimento de sua função expressa pela unidade funcional UF da **Questão 6**?

a) Distribuição: Descreva como ocorre a logística de distribuição do produto até o cliente. Utilizar o **Quadro 45** da **Parte 4** deste questionário.

Resposta:

b) Uso: Qual é a vida útil do produto? Quais são as principais atividades de manutenção existentes durante a fase de uso do produto?

Resposta:

c) Fim de vida: Quais são as estratégias de fim de vida para o produto após o término de sua vida útil? Qual é a estratégia predominante?

Resposta:

Parte 4: Questões sobre as principais matérias-primas e insumos
(coletar as informações tomando como referência a unidade funcional do estudo)

8. Quais são as matérias-primas e insumos consumidos na manufatura do produto?

a) Quantificação das matérias-primas e insumos consumidos. Utilizar *folha de coleta de dados do Anexo A* relativamente a cada processo elementar do fluxograma da **Questão 3**.

Resposta:

b) Quais são os valores médios das propriedades (químicas, físicas, mecânicas) das principais matérias-primas e insumos consumidos na manufatura do produto? Solicitar *fornecimento de especificação técnica dos insumos e matérias-primas*.

Resposta:

9. Qual é a demanda energética para as unidades produtivas (eletricidade, vapor, energia térmica)? Como é suprida esta demanda de energia internamente? Utilizar *folha de coleta de dados do Anexo A* para organização dos dados.

Resposta:

10. Quais são os principais subprodutos e emissões na manufatura do produto? *Utilizar folha de coleta de dados do Anexo A para organização das informações.*

Resposta:

11. Quais são os modos de transporte utilizados para as matérias primas, insumos e subprodutos?

Descrição da matéria prima, insumo, subproduto	Tipo de Transporte:		
	Distância (km)	Carga transportada (ton)	Retorna vazio? (sim/não)

Quadro 45 – Exemplo de lista para coleta de dados referentes aos modos de transporte utilizados

Fonte: Adaptado de ABNT (2009b)

12. Qual é o ano e o período de referência para o conjunto de dados coletado nas **questões de 8 a 11?**

Resposta:

13. Listar as principais limitações (dados remanescentes não coletados durante a visita técnica) e considerações importantes em relação ao consumo matérias-primas, insumos e a geração de subprodutos e emissões na manufatura.

Resposta:

APÊNDICE D – Ferramenta para guiar a realização da Etapa 4 da pré-avaliação

O passo a passo a seguir serve de ferramenta auxiliar durante a priorização de processos elementares da etapa de manufatura, os quais serão estudados durante as Etapas de 5 a 10 do procedimento de *GM* desenvolvido nesta tese.

O uso desta ferramenta deve ocorrer durante as primeiras visitas técnicas na indústria em estudo, preferencialmente logo após o processamento do questionário do **Apêndice C**.

A partir dos resultados da **questão 5b** do **Apêndice C**, deve-se preencher o Quadro 46, sobre a influência dos RTQP nos impactos ambientais a jusante (uso e pós-uso) do produto.

Entrevistado(s):			
Local e data da coleta de dados:			
Requisitos técnicos de qualidade do produto (RTQP) (dados coletados na questão 5b do Apêndice C)		O requisito pode afetar a etapa de uso do produto?	O requisito pode afetar a etapa de pós-uso do produto?
Propriedades físicas		Sim / Não / Não Aplicável (N. A.)	
Descrição do requisito	Unidade		
<i>Prop físi 1</i>	<i>Uni 1</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
<i>Prop físi 2</i>	<i>Uni 2</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
Propriedades químicas		Sim / Não / N.A.	
Descrição do requisito	Unidade		
<i>Prop química 1</i>	<i>Uni 1</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Prop química 2</i>	<i>Uni 2</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
Propriedades mecânicas		Sim / Não / N.A.	
Descrição do requisito	Unidade		
<i>Prop mec 1</i>	<i>Uni 1</i>	<i>Sim</i>	<i>N.A.</i>
<i>Prop mec 2</i>	<i>Uni 2</i>	<i>Sim</i>	<i>Sim</i>
Outras características de desempenho		Sim / Não / N.A.	
Descrição do requisito	Unidade		
<i>Outra prop 1</i>	<i>Uni 1</i>	<i>N.A.</i>	<i>Não</i>

Quadro 46 – Exemplo de lista para coleta de dados referentes à influência dos RTQP sobre os impactos a jusante no CVP

Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 46, “*Prop físi 1*”, “*Prop físi 2*”, “*Prop química 1*”, “*Prop química 2*”, “*Prop mec 1*”, “*Prop mec 2*”, e “*Outra prop 1*”, simbolizam os requisitos identificados para um produto qualquer. Nas demais colunas do quadro, é respondida se há ou não alguma influência conhecida dos requisitos sobre os impactos ambientais a jusante da manufatura. Trata-se de uma avaliação qualitativa, onde o conhecimento tácito (individual, próprio) do(s)

entrevistado(s) é externalizado ao entrevistador por meio de relatos orais e visuais, e depois, essas informações são julgadas se podem ou não ter algum efeito sobre os impactos ambientais a jusante da manufatura. Para o exemplo do Quadro 46, “*Prop físi 1*”, “*Prop mec 1*”, e “*Prop mec 2*” ilustram os requisitos julgados como relevantes pelo(s) entrevistado(s).

Então, no Quadro 47 são analisados aqueles requisitos destacados com “**sim**” como resposta no Quadro 46, para avaliar a influência dos processos elementares da etapa de manufatura sobre esses requisitos. O Quadro 47 deve ser utilizado para cada processo elementar de manufatura definido pelo fluxograma da **questão 3** do **Apêndice C**.

Processo elementar: <i>Processo 1</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades físicas</i>		Sim / Não
1	O processo 1 pode influenciar no requisito <i>Prop físi 1</i> ?	Sim
Questões para os requisitos: <i>propriedades mecânicas</i>		Sim / Não
2	O processo 1 pode influenciar no requisito <i>Prop mec 1</i> ?	Sim
3	O processo 1 pode influenciar no requisito <i>Prop mec 2</i> ?	Não

Quadro 47 – Exemplo de lista para coleta de dados referentes à influência dos processos elementares da etapa de manufatura sobre os RTQP

Fonte: elaborado pelo autor

No Quadro 47, cada requisito de qualidade selecionado é julgado pelo(s) entrevistado(s) com base em questões sobre a existência ou não de alguma influência do processo (*Processo 1*) sobre o requisito. Se a resposta for “**sim**”, isto implica que o processo de manufatura analisado pode influenciar nos impactos a jusante do CVP.

Para conclusão da análise, se propõe utilizar os seguintes critérios:

- **Muito relevante:** processo elementar da etapa de manufatura que tenha recebido **mais de 50,0% de respostas “sim”** para as questões do Quadro 47;
- **Relevante:** processo elementar da etapa de manufatura que tenha recebido de **30,0 e 50,0% de respostas “sim”** para as questões do Quadro 47; e
- **Pouco relevante:** processo elementar da etapa de manufatura que tenha recebido **menos de 30,0% de respostas “sim”** para as questões do Quadro 47.

Para o exemplo do Quadro 47, o *Processo 1* seria classificado como **muito relevante**, pois recebeu duas respostas “**sim**” entre as três questões realizadas. Este resultado de classificação deve ser utilizado para auxiliar na **Etapa 4** de aplicação do procedimento de *GM*. A seguir, são apresentados os resultados específicos desta análise para os estudos de caso conduzidos nesta tese.

D.1 Resultados para o estudo de caso na indústria madeireira – manufatura de painéis aglomerados

Os requisitos técnicos de qualidade do painel aglomerado estão listados no Quadro 48, sendo que o seu preenchimento ocorreu durante visita técnica feita numa indústria moveleira, cliente da indústria produtora dos painéis aglomerados.

Requisitos técnicos de qualidade do produto (RTQP)		O requisito pode afetar a etapa <i>uso 1</i> do produto?	O requisito pode afetar a etapa <i>uso 2</i> do produto?	O requisito pode afetar a etapa de <i>pós-uso</i> do produto?
Propriedades físicas		Sim / Não / N.A.		
Descrição do requisito	Unidade			
<i>Densidade</i>	<i>kg/m³</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>
<i>Espessura</i>	<i>mm</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Inchamento em espessura</i>	<i>%</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Teor de umidade</i>	<i>%</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
Propriedades mecânicas		Sim / Não / N.A.		
Descrição do requisito	Unidade			
<i>Módulo de elasticidade na flexão estática</i>	<i>MPa</i>	<i>N.A.</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Resistência mínima na flexão estática</i>	<i>MPa</i>	<i>N.A.</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>
<i>Resistência mínima na tração perpendicular</i>	<i>MPa</i>	<i>N.A.</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>

Quadro 48 – Influência dos RTQP sobre os impactos a jusante no CVP – estudo de caso 1

Fonte: elaborado pelo autor

As propriedades físico-mecânicas apresentadas no Quadro 48 foram selecionadas de acordo com a NBR 18140-2:2013 (ABNT, 2013). A fase de uso do painel foi dividida em *uso 1* e *uso 2*, respectivamente, associados ao uso do painel durante a manufatura do móvel de madeira, e ao uso do móvel consolidado pelo consumidor final. Para a etapa de pós-uso, foi assumida a destinação do móvel em aterro sanitário após 5 anos de vida útil.

Pelos resultados do Quadro 48, os requisitos **densidade**, **espessura** e **inchamento em espessura** apresentaram potencial para influenciar durante o *uso 1* e o pós-uso do produto. Conforme avaliação realizada pelo(s) entrevistado(s) da indústria, nenhuma das propriedades mecânicas foi julgada como relevante na análise, sendo que para o *uso 1* do produto, não foi possível responder as questões devido a falta de informações disponíveis.

Os requisitos espessura e inchamento em espessura foram julgados como passíveis de afetar o *uso 1*, pois painéis com variações dimensionais fora dos limites estipulados pela

NBR 18140-2:2013 ($\pm 0,3$ mm em espessura), podem afetar principalmente as atividades de acabamento do móvel a ser produzido. Por exemplo, em função de uma espessura maior ou menor do painel, poderá haver um consumo maior ou menor de tinta ou de verniz na etapa pintura do móvel de madeira.

Já o requisito densidade pode afetar os processos de usinagem do painel durante o *uso I*, pois a usinagem de painéis mais densos tende a demandar mais energia durante os processos de corte e de furação das chapas aglomeradas. Já durante o *pós-uso*, para um volume constante de painel e variando a sua densidade, a decomposição do painel em aterro sanitário poderá gerar taxas de emissão maiores ou menores de CO₂ e CH₄.

Desse modo, nos Quadros 49 a 53 são apresentados os resultados da influência de cada processo elementar da etapa de manufatura do painel aglomerado sobre os requisitos **densidade, espessura e inchamento em espessura**. Este levantamento foi realizado durante as visitas técnicas realizadas na produtora de painéis aglomerados.

Processo elementar: <i>Geração de partículas</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades físicas</i>		Sim / Não
1	O processo <i>Geração de partículas</i> pode influenciar no requisito <i>Densidade</i> ?	<i>Sim</i>
2	O processo <i>Geração de partículas</i> pode influenciar no requisito <i>Espessura</i> ?	<i>Não</i>
3	O processo <i>Geração de partículas</i> pode influenciar no requisito <i>Inchamento em espessura</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 49 – Influência do processo *geração de partículas* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Secagem e classificação de partículas</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades físicas</i>		Sim / Não
1	O processo <i>Secagem e classificação de partículas</i> pode influenciar no requisito <i>Densidade</i> ?	<i>Não</i>
2	O processo <i>Secagem e classificação de partículas</i> pode influenciar no requisito <i>Espessura</i> ?	<i>Não</i>
3	O processo <i>Secagem e classificação de partículas</i> pode influenciar no requisito <i>Inchamento em espessura</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 50 – Influência do processo *secagem e classificação de partículas* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: Encolagem e formação do colchão		Respostas
Questões para os requisitos: propriedades físicas		Sim / Não
1	O processo <i>Encolagem e formação do colchão</i> pode influenciar no requisito <i>Densidade</i> ?	<i>Não</i>
2	O processo <i>Encolagem e formação do colchão</i> pode influenciar no requisito <i>Espessura</i> ?	<i>Não</i>
3	O processo <i>Encolagem e formação do colchão</i> pode influenciar no requisito <i>Inchamento em espessura</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 51 – Influência do processo *encolagem e formação do colchão* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: Prensagem à quente		Respostas
Questões para os requisitos: propriedades físicas		Sim / Não
1	O processo <i>Prensagem à quente</i> pode influenciar no requisito <i>Densidade</i> ?	<i>Sim</i>
2	O processo <i>Prensagem à quente</i> pode influenciar no requisito <i>Espessura</i> ?	<i>Sim</i>
3	O processo <i>Prensagem à quente</i> pode influenciar no requisito <i>Inchamento em espessura</i> ?	<i>Sim</i>

Quadro 52 – Influência do processo *prensagem à quente* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: Acabamento e embalagem		Respostas
Questões para os requisitos: propriedades físicas		Sim / Não
1	O processo <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar no requisito <i>Densidade</i> ?	<i>Não</i>
2	O processo <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar no requisito <i>Espessura</i> ?	<i>Não</i>
3	O processo <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar no requisito <i>Inchamento em espessura</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 53 – Influência do processo *acabamento e embalagem* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Tomando os resultados dos Quadro 49 a 53, o processo elementar *prensagem à quente* foi classificado como **muito relevante**, enquanto que os processos *geração de partículas*, *secagem e classificação de partículas*, *encolagem e formação do colchão*, e *acabamento e embalagem* foram classificados como **pouco relevantes**.

D.2 Resultados para o estudo de caso na indústria automotiva – manufatura de válvulas

Os resultados da análise da influência de cada RTQP sobre os impactos ambientais durante as etapas de uso e de fim de vida das válvulas seguem no Quadro 54. O preenchimento dessa folha de coleta de dados ocorreu durante visita técnica feita numa indústria montadora de motores de veículos, cliente da fabricante de válvulas.

Requisitos técnicos de qualidade do produto (RTQP)		O requisito pode afetar o uso 1 do produto?	O requisito pode afetar o uso 2 do produto?	O requisito pode afetar o pós-uso do produto?
Propriedades físicas		Sim / Não / N.A.		
Descrição do requisito	Unidade			
<i>Circularidade RONt da haste</i>	μm	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
<i>Circularidade RONt da sede</i>	μm	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
<i>Diâmetro da haste</i>	<i>mm</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
<i>Rugosidade Ra da haste</i>	μm	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
<i>Rugosidade Ra da sede</i>	μm	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
Propriedades mecânicas		Sim / Não / N.A.		
Descrição do requisito	Unidade			
<i>Dureza da cabeça</i>	<i>HRC</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
<i>Dureza da haste</i>	<i>HRC</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>
<i>Dureza do topo</i>	<i>HRC</i>	<i>Não</i>	<i>Sim</i>	<i>Não</i>

Quadro 54 – Influência dos RTQP sobre os impactos a jusante do CVP – estudo de caso 2

Fonte: elaborado pelo autor

A fase de *uso 1* das válvulas diz respeito à montagem do motor de veículo, já o *uso 2* está relacionado ao uso do motor pelo consumidor final. Para a etapa de pós-uso, foi assumida a destinação das válvulas em aterro sanitário após 300.000,0 km de vida útil.

Pelos resultados do Quadro 54, em relação ao *uso 2*, **todas as propriedades físico-mecânicas** foram julgadas relevantes pelo(s) entrevistado(s). Já em relação ao *uso 1* e o *pós-uso*, nenhum dos requisitos foi julgado como relevante.

Todos os RTQP foram julgados como passíveis de afetar o *uso 2*, pois circularidade, rugosidade, e o diâmetro da haste das válvulas podem afetar diretamente a dinâmica gasosa dos ciclos de admissão e de escape do motor, e assim, podem influenciar no consumo de combustível e nas emissões gasosas da combustão. Já as propriedades mecânicas de dureza podem influenciar na vida útil das válvulas, pois se a dureza estiver abaixo do esperado a vida útil do componente poderá ser reduzida, e isso afetará no consumo total de combustível e nas emissões da combustão geradas ao longo da vida útil do produto.

Desse modo, nos Quadros 55 a 62 são apresentados os resultados da influência de cada processo elementar da etapa de manufatura das válvulas sobre a determinação dos requisitos **circularidade (haste e sede), diâmetro da haste, rugosidade (haste e sede), e dureza (cabeça, haste e topo)**. Esse levantamento foi realizado durante as visitas técnicas realizadas na produtora de válvulas automotivas.

Processo elementar: <i>Processamento de tarugos</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades físicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar na <i>Circularidade da haste</i> ?	<i>Não</i>
2	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar na <i>Circularidade da sede</i> ?	<i>Não</i>
3	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar no <i>Diâmetro da haste</i> ?	<i>Não</i>
4	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da haste</i> ?	<i>Não</i>
5	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da sede</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 55 – Influência do *processamento de tarugos* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Processamento de tarugos</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades mecânicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar na <i>Dureza da cabeça</i> ?	<i>Não</i>
2	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar na <i>Dureza da haste</i> ?	<i>Não</i>
3	O <i>Processamento de tarugos</i> pode influenciar na <i>Dureza do topo</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 56 – Influência do *processamento de tarugos* sobre os RTQP – propriedades mecânicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Processamento da haste</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades físicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar na <i>Circularidade da haste</i> ?	<i>Sim</i>
2	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar na <i>Circularidade da sede</i> ?	<i>Não</i>
3	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar no <i>Diâmetro da haste</i> ?	<i>Sim</i>
4	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da haste</i> ?	<i>Sim</i>
5	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da sede</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 57 – Influência do *processamento da haste* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Processamento da haste</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades mecânicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar na <i>Dureza da cabeça</i> ?	<i>Não</i>
2	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar na <i>Dureza da haste</i> ?	<i>Sim</i>
3	O <i>Processamento da haste</i> pode influenciar na <i>Dureza do topo</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 58 – Influência do *processamento da haste* sobre os RTQP – propriedades mecânicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Processamento da cabeça</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades físicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar na <i>Circularidade da haste</i> ?	<i>Não</i>
2	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar na <i>Circularidade da sede</i> ?	<i>Sim</i>
3	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar no <i>Diâmetro da haste</i> ?	<i>Não</i>
4	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da haste</i> ?	<i>Não</i>
5	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da sede</i> ?	<i>Sim</i>

Quadro 59 – Influência do *processamento da cabeça* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Processamento da cabeça</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades mecânicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar na <i>Dureza da cabeça</i> ?	<i>Sim</i>
2	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar na <i>Dureza da haste</i> ?	<i>Não</i>
3	O <i>Processamento da cabeça</i> pode influenciar na <i>Dureza do topo</i> ?	<i>Sim</i>

Quadro 60 – Influência do *processamento da cabeça* sobre os RTQP – propriedades mecânicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Acabamento e embalagem</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades físicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar na <i>Circularidade da haste</i> ?	<i>Não</i>
2	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar na <i>Circularidade da sede</i> ?	<i>Não</i>
3	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar no <i>Diâmetro da haste</i> ?	<i>Não</i>
4	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da haste</i> ?	<i>Não</i>
5	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar na <i>Rugosidade da sede</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 61 – Influência do *acabamento e embalagem* sobre os RTQP – propriedades físicas

Fonte: elaborado pelo autor

Processo elementar: <i>Acabamento e embalagem</i>		Respostas
Questões para os requisitos: <i>propriedades mecânicas</i>		Sim / Não
1	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar na <i>Dureza da cabeça</i> ?	<i>Não</i>
2	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar na <i>Dureza da haste</i> ?	<i>Não</i>
3	O <i>Acabamento e embalagem</i> pode influenciar na <i>Dureza do topo</i> ?	<i>Não</i>

Quadro 62 – Influência do *acabamento e embalagem* sobre os RTQP – propriedades mecânicas

Fonte: elaborado pelo autor

Portanto, tomando os resultados dos Quadro 55 a 62 é possível afirmar que o *processamento de tarugos* e *acabamento e embalagem* podem ser enquadrados como **pouco relevantes**. Porém, tanto o *processamento da haste* quanto o *processamento da cabeça* das válvulas foram classificados como **relevantes** na análise.

APÊNDICE E – Questionário panorama – parte B

As informações coletadas nesta segunda parte do questionário panorama serviram para guiar a condução das macroetapas de **avaliação e monitoramento** e de **pós-avaliação** do procedimento de *GM* desenvolvido nesta tese.

Parte 1: Identificação da empresa visitada, produto e processos

Data da visita técnica: _____

Empresa: _____ Estado: _____ Cidade: _____

Endereço: _____

Entrevistado(s)/fonte de
informação: _____

Produto a ser estudado escolhido no **Apêndice C**: _____

Processo(s) elementar(es) selecionado(s) com a conclusão da **Etapa 4 da pré-avaliação**:

Parte 2: Questões específicas sobre o processo estudado

1. Quais são os parâmetros de processo relevantes para o processo elementar de manufatura escolhido? *Selecionar os principais parâmetros do processo e quantificar sua faixa aceitável de variação (valores máximos, mínimos, e médias).*

Resposta:

2. Quais são os requisitos técnicos de qualidade do produto (RTQP) afetados pelo processo elementar de manufatura? *Quantificar os requisitos (valores mínimos, máximos, e médias) e as formas de medição disponíveis.*

Resposta:

3. O processo elementar de manufatura encontra-se agregado como um subsistema? Se sim, quais são os processos contidos neste subsistema? *Com base nos processos listados, o(s) entrevistado(s) deve(m) seleccionar qual processo será priorizado. Levar em conta os resultados da **pré-avaliação** para a tomada de decisão.*

Resposta:

4. É possível detalhar/estratificar o processo elementar de manufatura seleccionado na **questão 3** em nível de suas subunidades, i.e., máquina-ferramenta e seus sistemas auxiliares? *Utilizar o esquema da **Figura 40** para auxílio.*

Resposta:

5. Quais são os modos de operação existentes para o processo elementar de manufatura escolhido? *Tomar como base os modos de operação de A a F do **Quadro 15** para auxílio.*

Resposta:

6. Preencher o Quadro 16 da **Matriz de Relacionamentos**. *Considerar como aspectos ambientais de interesse aqueles destacados na **Etapa 4** da macroetapa de **pré-avaliação**.*

Resposta:

7. Qual é o tempo de operação do processo elementar de manufatura por modo de operação e subunidade? *Tomar como base os resultados da **questão 6**.*

Resposta:

APÊNDICE F – Matriz de monitoramento ambiental dos processos de manufatura

F.1 Resultados para a manufatura de painéis aglomerados – processo de prensagem à quente

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios e os desvios padrões dos resultados para as 12 condições experimentais delineadas.

Tabela 17 – Matriz de monitoramento ambiental do processo: prensagem à quente

Identificação do processo elementar:	Processo de prensagem à quente		Material processado: Colchão de partículas			Local de origem dos dados:		LaMEM-EESC-USP
			Fluxo de referência do processo elementar:			235,0 kg de painel aglomerado		
Tratamentos	Tempo de experimento [min]	Modo de operação ativo	Subunidade ativa	Aspectos ambientais monitorados		Requisitos técnicos de qualidade de cada chapa aglomerada		
				Consumo de eletricidade [kWh]	Emissão ao ar de formaldeído [g]	Espessura [mm]	Densidade [kg/m³]	Inchamento em espessura [%]
3,0MPa; 160,0°C	52,00 ± 2,03	A	Aquecimento	0,37 ± 0,02	-	14,39 ± 0,45	550,00 ± 0,02	6,89 ± 0,01
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,23 ± 0,03	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,02	-			
			Prensagem	-	45,32 ± 1,82			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,32 ± 0,03	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
	75,00 ± 2,03	TOTAL		1,22 ± 0,08	45,32 ± 1,82			
		Min		1,16	43,93	14,05	530,00	5,68
		Máx		1,31	47,38	14,90	580,00	7,67
3,0MPa; 165,0°C	53,80 ± 1,20	A	Aquecimento	0,39 ± 0,03	-	14,57 ± 0,38	590,00 ± 0,02	8,43 ± 0,02
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,27 ± 0,02	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
			Prensagem	-	49,11 ± 1,13			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,35 ± 0,03	-			

	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
	73,80 ± 0,00	TOTAL		1,31 ± 0,03	49,11 ± 1,13			
		Min		1,27	48,02	14,27	570,00	6,14
		Máx		1,34	50,28	15,00	610,00	10,98
3,0MPa; 170,0°C	63,40 ± 1,80	A	Aquecimento	0,45 ± 0,01	-	14,85 ± 0,24	590,00 ± 0,01	7,27 ± 0,02
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,39 ± 0,02	-			
			Hidráulica	0,14 ± 0,03	-			
			Prensagem	-	52,95 ± 2,94			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,41 ± 0,06	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,02	-			
	83,40 ± 1,80	TOTAL		1,54 ± 0,03	52,95 ± 2,94			
		Min		1,51	49,96	14,58	590,00	5,15
		Máx		1,57	55,85	15,00	600,00	9,10
3,5MPa; 160,0°C	56,20 ± 1,20	A	Aquecimento	0,38 ± 0,01	-	14,15 ± 0,15	620,00 ± 0,02	9,75 ± 0,04
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,28 ± 0,02	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
			Prensagem	-	50,08 ± 0,84			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,37 ± 0,03	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,14 ± 0,01	-			
	76,20 ± 1,20	TOTAL		1,32 ± 0,03	50,08 ± 0,84			
		Min		1,29	49,32	14,02	600,00	6,15
		Máx		1,36	50,99	14,31	630,00	14,04
3,5MPa; 165,0°C	58,00 ± 1,80	A	Aquecimento	0,40 ± 0,01	-	14,27 ± 0,27	580,00 ± 0,01	6,71 ± 0,01
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,30 ± 0,01	-			
			Hidráulica	0,14 ± 0,02	-			
			Prensagem	-	50,31 ± 0,73			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,41 ± 0,02	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,02	-			
	78,00 ± 1,80	TOTAL		1,40 ± 0,04	50,31 ± 0,73			
		Min		1,37	49,62	13,96	570,00	6,65

		Máx		1,45	51,07	14,43	580,00	6,73
3,5MPa; 170,0°C	62,80 ± 2,40	A	Aquecimento	0,51 ± 0,02	-	14,65 ± 0,76	600,00 ± 0,01	5,72 ± 0,01
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,58 ± 0,07	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,02	-			
			Prensagem	-	54,09 ± 1,31			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,39 ± 0,05	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,03	-			
	82,80 ± 2,40	TOTAL		1,78 ± 0,12	54,09 ± 1,31			
		Min		1,67	52,60	13,77	590,00	4,64
		Máx		1,90	55,07	15,10	610,00	7,09
4,0MPa; 160,0°C	58,60 ± 1,20	A	Aquecimento	0,38 ± 0,01	-	15,00 ± 0,16	710,00 ± 0,01	7,21 ± 0,01
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,31 ± 0,04	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
			Prensagem	-	52,69 ± 1,40			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,34 ± 0,03	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,02	-			
	78,60 ± 1,20	TOTAL		1,33 ± 0,06	52,69 ± 1,40			
		Min		1,28	51,14	14,84	700,00	6,71
		Máx		1,40	53,87	15,15	720,00	7,60
4,0MPa; 165,0°C	62,20 ± 0,60	A	Aquecimento	0,39 ± 0,00	-	13,77 ± 0,10	697,00 ± 0,01	4,53 ± 0,01
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,33 ± 0,02	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,03	-			
			Prensagem	-	43,29 ± 1,76			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,38 ± 0,04	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
	82,60 ± 0,60	TOTAL		1,40 ± 0,04	43,29 ± 1,76			
		Min		1,37	41,48	13,17	690,00	4,05
		Máx		1,47	44,99	14,91	700,00	5,07
4,0MPa; 170,0°C	67,60 ± 2,40	A	Aquecimento	0,49 ± 0,01	-	14,54 ± 0,39	723,00 ± 0,02	6,81 ± 0,03
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,46 ± 0,18	-			
			Hidráulica	0,14 ± 0,03	-			

		D	Prensagem	-	52,96 ± 0,97			
	5,00 ± 0,00		Aquecimento	0,41 ± 0,17	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,03	-			
	67,60 ± 2,40	TOTAL		1,65 ± 0,30	52,96 ± 0,97			
		Min		1,45	51,92	14,17	700,00	5,10
		Máx		2,00	53,86	14,94	740,00	10,11
4,5MPa; 160,0°C	53,20 ± 1,20	A	Aquecimento	0,38 ± 0,00	-	14,87 ± 0,45	770,00 ± 0,01	7,72 ± 0,02
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,28 ± 0,03	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
			Prensagem	-	45,49 ± 0,84			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,44 ± 0,05	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,14 ± 0,02	-			
	73,20 ± 1,20	TOTAL		1,39 ± 0,06	45,49 ± 0,84			
		Min		1,32	44,54	14,35	760,00	5,86
		Máx		1,45	46,15	15,16	780,00	10,03
4,5MPa; 165,0°C	58,00 ± 1,20	A	Aquecimento	0,41 ± 0,00	-	14,70 ± 0,17	780,00 ± 0,01	10,62 ± 0,03
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,32 ± 0,02	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,03	-			
			Prensagem	-	49,62 ± 0,48			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,49 ± 0,06	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,02	-			
	78,00 ± 1,20	TOTAL		1,52 ± 0,05	49,62 ± 0,48			
		Min		1,47	40,14	14,55	770,00	8,89
		Máx		1,53	50,10	14,89	790,00	13,89
4,5MPa; 170,0°C	65,80 ± 1,20	A	Aquecimento	0,59 ± 0,02	-	14,28 ± 0,02	780,00 ± 0,01	7,78 ± 0,01
	10,00 ± 0,00	B	Aquecimento	0,45 ± 0,03	-			
			Hidráulica	0,15 ± 0,01	-			
			Prensagem	-	41,39 ± 3,30			
	5,00 ± 0,00	D	Aquecimento	0,41 ± 0,02	-			
	5,00 ± 0,00		Hidráulica	0,15 ± 0,02	-			
	85,80 ± 1,20	TOTAL		1,75 ± 0,15	41,39 ± 3,30			

		Min	1,66	37,60	14,26	770,00	6,90
		Máx	1,93	43,62	14,29	790,00	8,33

Fonte: elaborado pelo autor

F.2 Resultados para a manufatura de válvulas de motor – processo de retificação *centerless* da haste

Na Tabela 18 são apresentados os valores médios e os desvios padrões dos resultados da etapa de monitoramento do processo de retificação para os 27 tratamentos delineados.

Tabela 18 – Matriz de monitoramento ambiental do processo: retificação *centerless* da haste

Identificação do processo elementar:	Processo de retificação	Material processado:		Válvulas de motor		Local de origem dos dados:		LAPRAS- NUMA-EESC- USP	
		Fluxo de referência do processo elementar:				4 válvulas de escape (176,4 g)			
Tratamentos	Tempo de experimento [s]	Modo de operação ativo	Subunidade ativa	Aspectos ambientais monitorados		Requisitos técnicos de qualidade de cada válvula			
				Consumo de eletricidade [kJ]	Consumo de fluido de corte [litros]	Rugosidade Ra da haste [μm]	Diâmetro final da haste [mm]	Circularidade RONT da haste [μm]	
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,002 ± 0,001	-	0,90 ± 0,04	5,61 ± 0,01	15,78 ± 0,01	
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,10	-				
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,05	-				
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,97	-				

	600,00 ± 0,00		Lubrificação	11,66 ± 4,80	-							
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 2,00	-							
	4,00 ± 0,00	C	Todas	63,92 ± 4,84	4,80 ± 0,00							
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 2,00	-							
	40,00 ± 0,00	F	Todas	230,40 ± 3,88	-							
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 2,00	-							
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	1,73 ± 0,05	-							
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-							
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-							
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-							
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-							
		TOTAL			1.361,23 ± 4,84				4,80 ± 0,00			
	974,00 ± 0,00	Min			1.356,14				4,80	0,85	5,60	15,77
	Máx			1.367,68	4,80	0,94	5,62	15,79				

Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,93 ± 0,02	5,73 ± 0,02	15,80 ± 0,02			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,29 ± 0,10	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,06	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,53 ± 0,77	-						
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	8,90 ± 7,80	-						
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 1,20	-						
	4,00 ± 0,00	C	Todas	62,40 ± 7,84	4,80 ± 0,00						
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 1,20	-						
	15,00 ± 0,00	F	Todas	89,03,40 ± 6,43	-						
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 1,20	-						
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de	0,42 ± 0,00	-						

			corte					
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.184,66 ± 7,36	4,80 ± 0,00	0,90	5,60	15,79
		Min		1.173,77	4,80			
		Máx		1.190,64	4,80			
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	1,42 ± 0,02	5,74 ± 0,02	16,00 ± 0,75
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,29 ± 0,009	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,03	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,53 ± 0,37	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	11,27 ± 2,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 2,00	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	59,48 ± 2,84	4,80 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 2,00	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	45,41 ± 1,04	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 2,00	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	1,64 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	941,50 ± 0,00	TOTAL		1.140,67 ± 2,00	4,80 ± 0,00			
		Min		1.138,68	4,80			
		Máx		1.142,82	4,80			
Nº passes =	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,002 ± 0,001	-	0,46 ± 0,03	5,62 ± 0,01	10,59 ± 0, 51

4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,009	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,04	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,17	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	8,83 ± 2,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,00	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	54,68 ± 4,94	4,80 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,00	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	461,00 ± 4,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,00	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	974,00 ± 0,00	TOTAL		1.578,12 ± 5,58	4,80 ± 0,00			
		Min		1.585,35	4,80	0,43	5,64	11,25
		Máx		1.572,55	4,80	0,50	5,61	10,00
Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,90 ± 0,01	5,62 ± 0,02	13,00 ± 2,19
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,28 ± 0,009	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,04	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,17	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	11,25 ± 3,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,10	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	56,00 ± 3,91	4,80 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,10	-			

	15,00 ± 0,00	F	Todas	177,30 ± 4,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,10	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	2,78 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.289,38 ± 3,12	4,80 ± 0,00			
		Min		1.285,81	4,80	0,89	5,60	10,10
		Máx		1.293,42	4,80	0,91	5,64	15,40
Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,89 ± 0,03	5,61 ± 0,55	14,00 ± 0,71
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,29 ± 0,01	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,56 ± 0,47	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	12,16 ± 2,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	337,20 ± 4,00	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	62,96 ± 4,94	4,80 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	337,20 ± 4,00	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	92,03 ± 4,69	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	337,20 ± 4,00	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			

	941,50 ± 0,00	TOTAL		1.181,13 ± 4,69	4,80 ± 0,00			
		Min		1.176,56	4,80	0,87	5,07	13,00
		Máx		1.185,85	4,80	0,92	6,38	14,57
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,43 ± 0,02	5,61 ± 0,08	9,56 ± 0,11
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,28 ± 0,008	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,04	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,37	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	12,35 ± 2,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 2,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	56,60 ± 4,81	4,80 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 2,30	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	698,40 ± 4,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 2,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	974,00 ± 0,00	TOTAL		1.809,50 ± 4,81	4,80 ± 0,00			
		Min		1.805,70	4,80	0,40	5,50	9,43
		Máx		1.816,50	4,80	0,45	5,68	9,70
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,30 ± 0,02	5,62 ± 0,01	10,00 ± 0,47
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,28 ± 0,007	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,03	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,28	-			

	600,00 ± 0,00		Lubrificação	13,04 ± 7,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,00	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	56,52 ± 7,94	4,80 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,00	-			
	15,00 ± 0,00	F	Todas	265,35 ± 7,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,00	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
		TOTAL		1.377,06 ± 7,31	4,80 ± 0,00			
	949,00 ± 0,00	Min		1.368,02	4,80	0,28	5,60	9,50
		Máx		1.383,99	4,80	0,33	5,63	10,60
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,02	-	0,45 ± 0,02	5,62 ± 0,01	11,75 ± 0,17
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,29 ± 0,009	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,08	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,53 ± 0,87	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	14,49 ± 9,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 5,00	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	56,00 ± 9,94	4,80 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 5,00	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	136,05 ± 6,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 5,00	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			

	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	941,50 ± 0,00	TOTAL		1.229,50 ± 11,80	4,80 ± 0,00			
		Min		1.176,56	4,80	0,44	5,61	11,50
		Máx		1.185,85	4,80	0,48	5,64	11,90
Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,002 ± 0,001	-	0,93 ± 0,04	5,61 ± 0,01	14,40 ± 0,66
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,009	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,04	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,17	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	8,27 ± 12,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,00	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	76,80 ± 10,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,00	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	231,40 ± 14,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,00	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	974,00 ± 0,00	TOTAL		1.370,08 ± 12,63	6,67 ± 0,00			
		Min		1.355,00	6,67	0,89	5,60	13,50
		Máx		1.385,90	6,67	0,97	5,63	14,91
Nº passes = 2; Vazão =	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,96 ± 0,02	5,62 ± 0,09	15,00 ± 2,71
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,29 ± 0,009	-			

25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,04	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,53 ± 0,17	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	11,27 ± 8,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 1,00	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	76,00 ± 9,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 1,00	-			
	15,00 ± 0,00	F	Todas	89,03 ± 8,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 1,00	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,39 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.199,55 ± 9,42	6,67 ± 0,00			
		Min		1.187,66	6,67	0,94	5,50	13,00
		Máx		1.208,60	6,67	0,98	5,70	19,00
Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	1,00 ± 0,14	5,74 ± 0,28	14,40 ± 1,56
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,56 ± 0,13	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	12,70 ± 8,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	345,20 ± 2,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	74,68 ± 8,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	345,20 ± 2,30	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	45,34 ± 8,99	-			

	30,00 ± 0,00	D	Todas	345,20 ± 2,30	-						
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-						
	941,50 ± 0,00		TOTAL		1.170,72 ± 8,56				6,67 ± 0,00		
		Min		1.158,69	6,67				0,89	5,26	12,30
		Máx		1.178,62	6,67				1,20	5,90	16,00

Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,002 ± 0,001	-	0,35 ± 0,07	5,61 ± 0,22	9,85 ± 0,13
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,13	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	14,30 ± 3,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	75,40 ± 3,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,50 ± 3,30	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	462,60 ± 3,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico Primário	0,25 ± 0,00	-			
				0,003 ± 0,00	-			

	974,00 ± 0,00	TOTAL		1.605,91 ± 3,98	6,67 ± 0,00			
		Min		1.601,02	6,67	0,28	5,30	9,70
		Máx		1.610,55	6,67	0,45	5,80	10,00
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,76 ± 0,04	5,61 ± 0,33	9,91 ± 0,71
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,27 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,29 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,13	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	14,98 ± 3,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,00 ± 2,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	66,84 ± 2,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,00 ± 2,30	-			
	15,00 ± 0,00	F	Todas	177,38 ± 2,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,00 ± 2,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.281,52 ± 3,50	6,67 ± 0,00			
		Min		1.276,69	6,67	0,71	5,12	9,00
		Máx		1.284,56	6,67	0,80	5,82	10,73
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,80 ± 0,02	5,62 ± 0,02	13,10 ± 0,76
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,27 ± 0,005	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,29 ± 0,04	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,73	-			

	600,00 ± 0,00		Lubrificação	13,83 ± 8,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,00 ± 8,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	66,00 ± 3,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,00 ± 8,30	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	91,58 ± 7,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,00 ± 8,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
		TOTAL		1.193,73 ± 8,03	6,67 ± 0,00			
	941,50 ± 0,00	Min		1.200,40	6,67	0,78	5,60	12,14
		Máx		1.182,52	6,67	0,82	5,64	14,01
Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,002 ± 0,001	-	0,65 ± 0,08	5,61 ± 0,10	10,05 ± 0,10
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,13	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	9,19 ± 3,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	64,36 ± 3,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,50 ± 3,30	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	691,80 ± 3,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			

	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-						
	974,00 ± 0,00	TOTAL		1.818,96 ± 4,20	6,67 ± 0,00						
Min		1.813,18	6,67	0,52	5,47	9,90					
Máx		1.823,16	6,67	0,70	5,70	10,12					
Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,27 ± 0,05	5,62 ± 0,02	9,95 ± 0,07			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,28 ± 0,001	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,05	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,10	-						
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	13,17 ± 1,80	-						
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 1,30	-						
	4,00 ± 0,00	C	Todas	64,16 ± 1,94	6,67 ± 0,00						
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 1,30	-						
	15,00 ± 0,00	F	Todas	265,35 ± 1,99	-						
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 1,30	-						
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-						
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-						
	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.384,83 ± 1,69	6,67 ± 0,00						
		Min		1.383,23	6,67				0,20	5,60	9,85
		Máx		1.387,16	6,67				0,32	5,65	10,01
Nº passes = 6; Vazão =	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,33 ± 0,05	5,62 ± 0,02	12,10 ± 0,16			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,001	-						

25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,56 ± 0,13	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	10,93 ± 3,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	345,20 ± 4,40	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	63,20 ± 4,94	6,67 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	345,20 ± 4,40	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	135,64 ± 4,99	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	345,20 ± 4,40	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00	E	Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	941,50 ± 0,00	TOTAL		1.247,77 ± 4,17	6,67 ± 0,00			
		Min		1.244,31	6,67	0,27	5,60	11,90
		Máx		1.252,80	6,67	0,40	5,64	12,30
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,66 ± 0,06	5,60 ± 0,01	13,22 ± 0,21
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,33 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	14,00 ± 2,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,20 ± 3,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	85,70 ± 2,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,20 ± 1,30	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	231,80 ± 2,09	-			

	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,20 ± 2,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	974,00 ± 0,00	TOTAL		1.372,58 ± 2,20	9,60 ± 0,00			
		Min		1.369,67	9,60	0,62	5,59	12,92
		Máx		1.374,72	9,60	0,74	5,61	13,40
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,79 ± 0,03	5,73 ± 0,02	13,80 ± 0,34
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,29 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,53 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	11,67 ± 4,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 5,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	80,00 ± 2,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 5,30	-			
	15,00 ± 0,00	F	Todas	89,03 ± 4,09	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	340,20 ± 5,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00			0,003 ± 0,00	-			

	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.203,66 ± 5,32	9,60 ± 0,00			
		Min		1.198,35	9,60	0,76	5,60	13,33
		Máx		1.209,17	9,60	0,83	5,65	14,09
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,88 ± 0,07	5,62 ± 0,01	13,65 ± 0,04
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,31 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,33 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,58 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	12,33 ± 1,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 1,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	77,08 ± 1,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 1,30	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	45,26 ± 1,09	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 1,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	941,50 ± 0,00	TOTAL		1.187,71 ± 1,35	9,60 ± 0,00			
	941,50 ± 0,00	Min		1.186,44	9,60	0,82	5,60	13,60
		Máx		1.189,39	9,60	0,97	5,63	13,69
Nº passes = 4; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,002 ± 0,001	-	0,46 ± 0,01	5,61 ± 0,02	9,78 ± 0,11
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,11	-			

	600,00 ± 0,00		Lubrificação	12,60 ± 2,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	80,64 ± 3,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,30	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	469,80 ± 3,09	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 3,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
		TOTAL		1.616,65 ± 3,51	9,60 ± 0,00			
	974,00 ± 0,00	Min		1.612,00	9,60	0,45	5,60	9,64
		Máx		1.620,00	9,60	0,48	5,64	9,90
Nº passes = 4; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,63 ± 0,08	5,62 ± 0,03	12,70 ± 0,11
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,28 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	11,19 ± 1,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,20 ± 1,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	79,20 ± 1,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,20 ± 1,30	-			
	15,00 ± 0,00	F	Todas	177,98 ± 1,09	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,20 ± 1,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			

	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.310,51 ± 1,83	9,60 ± 0,00			
		Min		1.308,22	9,60	0,51	5,59	12,55
		Máx		1.312,64	9,60	0,69	5,65	12,80
Nº passes = 4; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,95 ± 0,06	5,72 ± 0,06	13,00 ± 0,10
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,31 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,33 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,58 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	10,69 ± 1,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 1,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	78,84 ± 1,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 1,30	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	89,51 ± 1,09	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 1,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	941,50 ± 0,00	TOTAL		1.232,08 ± 1,04	9,60 ± 0,00			
		Min		1.231,14	9,60	0,88	5,55	12,87
		Máx		1.233,14	9,60	1,00	5,67	13,10
Nº passes = 6; Vazão =	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,002 ± 0,001	-	0,46 ± 0,02	5,60 ± 0,07	8,17 ± 0,10
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,30 ± 0,001	-			

36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,32 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,57 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	12,24 ± 8,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 8,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	79,52 ± 8,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 8,30	-			
	40,00 ± 0,00	F	Todas	689,60 ± 8,09	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,40 ± 8,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	974,00 ± 0,00	TOTAL		1.834,97 ± 8,16	9,60 ± 0,00			
		Min		1.825,55	9,60	0,44	5,50	8,08
		Máx		1.844,29	9,60	0,48	5,67	8,30
Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,32 ± 0,02	5,62 ± 0,09	12,09 ± 0,20
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,28 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,31 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,54 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	12,80 ± 4,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	79,70 ± 4,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 3,30	-			
	15,00 ± 0,00	F	Todas	265,35 ± 4,09	-			

	30,00 ± 0,00	D	Todas	346,60 ± 4,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			
	949,00 ± 0,00	TOTAL		1.400,00 ± 4,60	9,60 ± 0,00			
		Min		1.394,71	9,60	0,28	5,50	11,86
		Máx		1.405,06	9,60	0,34	5,73	12,30
Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	30,00 ± 0,00	A	Primário	0,003 ± 0,001	-	0,89 ± 0,01	5,61 ± 0,00	12,85 ± 0,01
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,31 ± 0,001	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,33 ± 0,02	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,58 ± 0,11	-			
	600,00 ± 0,00		Lubrificação	13,28 ± 2,80	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 3,30	-			
	4,00 ± 0,00	C	Todas	78,80 ± 3,94	9,60 ± 0,00			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	350,20 ± 4,30	-			
	7,50 ± 0,00	F	Todas	135,23 ± 4,09	-			
	30,00 ± 0,00	D	Todas	135,23 ± 3,30	-			
	30,00 ± 0,00	E	Lubrificação	0,10 ± 0,05	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de corte	0,42 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Rebolo de arraste	0,46 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Hidráulico	0,25 ± 0,00	-			
	30,00 ± 0,00		Primário	0,003 ± 0,00	-			

	941,50 ± 0,00	TOTAL	1.280,34 ± 4,64	9,60 ± 0,00			
		Min	1.275,05	9,60	0,88	5,61	12,84
		Máx	1.286,37	9,60	0,90	5,61	12,87

Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE G – Matriz de relacionamentos: correlação entre RTQP e aspectos ambientais das etapas de CVP a jusante da manufatura

G.1 Resultados para a manufatura de painéis aglomerados – processo de prensagem à quente

Com base nos resultados obtidos através da aplicação do questionário do **Apêndice E** junto à empresa produtora do roupeiro de madeira estudado nesta tese, foram estabelecidos os seguintes critérios:

- Para chapas aglomeradas produzidas com densidade acima de 700,0 kg/m³ (porém, abaixo de 800,0 kg/m³), o consumo de eletricidade por UF durante o *uso 1* pode aumentar em até 15,0%;
- Para um mesmo volume de material, e baseando-se no estudo de Micales e Skog (1997), para cada 630,0 kg de painel haverá geração de 1,3% de CO₂ e 1,9% de CH₄. Assim, as emissões de CO₂ e de CH₄ durante a fase de *pós-uso* dos painéis foram calculadas em função das densidades dos painéis produzidos;
- Painéis com espessuras abaixo de 1,0 mm do especificado (i.e., 15,0 mm), podem consumir 5,0% mais de tinta por UF durante o *uso 1*;
- O requisito de inchamento em espessura é importante, pois pode afetar a durabilidade do painel aglomerado, e assim, consequentemente afetar a vida útil do roupeiro durante o *uso 2*. Contudo, não foi possível correlacionar esta informação junto a nenhum dos aspectos ambientais envolvidos durante o *uso 2* do produto. Logo, não houve quantificação de nenhum aspecto ambiental no *uso 2*.

Assim, na Tabela 19 são apresentados os valores médios e os desvios padrões dos resultados da quantificação dos aspectos ambientais do painel de madeira afetados durante as etapas de uso e de pós-uso do produto. Para isso, tomaram-se os valores dos requisitos técnicos *espessura*, *densidade* e *inchamento em espessura* para cada um dos 12 tratamentos avaliados na seção F.1 do **Apêndice F**.

Tabela 19 – Correlação entre RTQP e as etapas do ciclo de vida a jusante da manufatura: estudo de caso na indústria madeireira

Local de origem dos dados:	Empresa produtora do roupeiro de madeira			Produto estudado:	Roupeiro de madeira	Fluxo de referência (FR):	1 unidade do roupeiro de madeira
Tratamentos	Requisitos técnicos de qualidade do produto (destacados na seção D.1 do Apêndice D)			Correlação dos RTQP com as etapas do ciclo de vida a jusante da manufatura			
				Etapa afetada	Aspectos ambientais afetados		Quantificação dos aspectos afetados
3,0 MPa; 160,0°C	Densidade	kg/m ³	550,00 ± 0,02	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	333,60 ± 0,00
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,00 ± 0,13
					Emissão de CH ₄	kg	4,30 ± 0,19
	Espessura	mm	14,39 ± 0,45	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,28 ± 0,02
	Inchamento em espessura	%	6,89 ± 0,01	Uso 2	N/A	-	-
3,0 MPa; 165,0°C	Densidade	kg/m ³	590,00 ± 0,02	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	333,60 ± 0,00
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,10 ± 0,10
					Emissão de CH ₄	kg	4,70 ± 0,15
	Espessura	mm	14,57 ± 0,38	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,16 ± 0,17
	Inchamento em espessura	%	8,43 ± 0,02	Uso 2	N/A	-	-
3,0 MPa; 170,0°C	Densidade	kg/m ³	590,00 ± 0,01	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	333,60 ± 0,00
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,10 ± 0,00
					Emissão de CH ₄	kg	4,60 ± 0,02
	Espessura	mm	14,85 ± 0,24	Uso 1	Consumo de tinta	kg	4,80 ± 0,00
	Inchamento em espessura	%	7,27 ± 0,02	Uso 2	N/A	-	-

3,5 MPa; 160,0°C	Densidade	kg/m ³	620,00 ± 0,02	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	333,60 ± 0,00
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,20 ± 0,11
					Emissão de CH ₄	kg	4,90 ± 0,17
	Espessura	mm	14,15 ± 0,15	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,20 ± 0,14
	Inchamento em espessura	%	9,75 ± 0,04	Uso 2	N/A	-	-
3,5 MPa; 165,0°C	Densidade	kg/m ³	580,00 ± 0,01	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	333,60 ± 0,00
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,00 ± 0,00
					Emissão de CH ₄	kg	4,50 ± 0,06
	Espessura	mm	14,27 ± 0,27	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,12 ± 0,14
	Inchamento em espessura	%	6,71 ± 0,01	Uso 2	N/A	-	-
3,5 MPa; 170,0°C	Densidade	kg/m ³	600,00 ± 0,01	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	333,60 ± 0,00
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,10 ± 0,06
					Emissão de CH ₄	kg	4,70 ± 0,09
	Espessura	mm	14,65 ± 0,76	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,28 ± 0,09
	Inchamento em espessura	%	5,72 ± 0,01	Uso 2	N/A	-	-
4,0 MPa; 160,0°C	Densidade	kg/m ³	710,00 ± 0,01	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	350,60 ± 1,05
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,70 ± 0,05
					Emissão de CH ₄	kg	5,60 ± 0,08
	Espessura	mm	15,00 ± 0,16	Uso 1	Consumo de tinta	kg	4,80 ± 0,00
	Inchamento em espessura	%	7,21 ± 0,01	Uso 2	N/A	-	-
4,0 MPa; 165,0°C	Densidade	kg/m ³	705,00 ± 0,01	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	348,00 ± 5,30
				Pós-uso	Emissão de CO ₂	kg	3,60 ± 0,03
					Emissão de CH ₄	kg	5,50 ± 0,05
	Espessura	mm	13,77 ± 0,10	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,16 ± 0,17
	Inchamento em	%	4,53 ± 0,01	Uso 2	N/A	-	-

	espessura						
4,0 MPa; 170,0°C	Densidade	kg/m³	723,00 ± 0,02	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	370,60 ± 11,02
				Pós-uso	Emissão de CO₂ Emissão de CH₄	kg kg	3,80 ± 0,10
	Espessura	mm	14,54 ± 0,39	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,70 ± 0,16
	Inchamento em espessura	%	6,81 ± 0,03	Uso 2	N/A	-	5,00 ± 0,17
4,5 MPa; 160,0°C	Densidade	kg/m³	770,00 ± 0,01	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	380,00 ± 5,30
				Pós-uso	Emissão de CO₂	kg	4,00 ± 0,05
					Emissão de CH₄	kg	6,00 ± 0,08
	Espessura	mm	14,87 ± 0,45	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,04 ± 0,17
Inchamento em espessura	%	7,72 ± 0,02	Uso 2	N/A	-	-	
4,5 MPa; 165,0°C	Densidade	kg/m³	780,00 ± 0,02	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	385,60 ± 5,20
				Pós-uso	Emissão de CO₂	kg	4,10 ± 0,05
					Emissão de CH₄	kg	6,10 ± 0,08
	Espessura	mm	14,70 ± 0,17	Uso 1	Consumo de tinta	kg	4,80 ± 0,00
Inchamento em espessura	%	10,62 ± 0,03	Uso 2	N/A	-	-	
4,5 MPa; 170,0°C	Densidade	kg/m³	780,00 ± 0,01	Uso 1	Consumo de eletricidade	MJ	383,30 ± 5,00
				Pós-uso	Emissão de CO₂	kg	4,10 ± 0,05
					Emissão de CH₄	kg	6,10 ± 0,08
	Espessura	mm	14,28 ± 0,02	Uso 1	Consumo de tinta	kg	5,28 ± 0,00
Inchamento em espessura	%	7,78 ± 0,01	Uso 2	N/A	-	-	

Fonte: elaborado pelo autor

G.2 Resultados para a manufatura de válvulas de motor – processo de retificação *centerless* da haste

A partir dos resultados da aplicação do questionário do **Apêndice E** junto à empresa montadora de veículo *marca 2*, foi estabelecido que:

- Válvulas com diâmetro acima de 0,1mm do especificado (i.e., 5,62 mm) podem afetar diretamente no processo de combustão interna do motor, aumentando a pressão de combustão, e assim, aumentando também o consumo de combustível em até 3,0% durante o *uso 2*;
- A rugosidade Ra da haste acima de 0,8 μ m pode afetar o consumo de combustível no *uso 2* das válvulas em 1,0%. Válvulas com rugosidade acima do especificado geram mais atrito durante os ciclos de admissão e escape no motor, aumentando também a demanda por combustível. Além disso, a rugosidade acima de 0,8 μ m afeta a durabilidade da peça durante o *uso 2*, sendo que neste caso estudado, a vida útil das válvulas foi estimada em ser 10,0% inferior ao padrão esperado de 300.000,00 km rodados. Assim, quando a vida útil do produto é reduzida em 10,0%, isso gera a necessidade de uma maior quantidade de produtos para cumprir a mesma função, e dessa forma, todos os aspectos ambientais da etapa de manufatura da válvula também foram estimados serem 10,0% superiores;
- A circularidade RONT da haste foi julgada como relevante sobre a vida útil das válvulas durante o *uso 2*. Valores de RONT acima de 13,0 μ m podem reduzir em até 10,0% a vida útil projetada das válvulas. Logo, nesse caso, os aspectos ambientais da manufatura das válvulas também foram considerados como 10,0% superiores;
- O requisito de dureza da haste é importante, pois pode afetar a durabilidade das válvulas, e assim, consequentemente afetar a vida útil do motor durante o *uso 2*. Contudo, não foi possível correlacionar esta informação junto a nenhum dos aspectos ambientais envolvidos durante o *uso 2* do produto, logo, a dureza da haste não foi um requisito avaliado nesta tese.

Com base nos critérios acima descritos, na sequência, a Tabela 20 apresenta os valores médios e os desvios padrões da quantificação dos aspectos ambientais das válvulas de motor afetados durante a etapa de uso do produto. Para isso, tomaram-se os resultados dos requisitos técnicos *circularidade da haste*, *diâmetro final da haste*, e *rugosidade da haste*, conforme a seção F.2 do **Apêndice F**.

Tabela 20 – Correlação entre RTQP e as etapas do ciclo de vida a jusante da manufatura: estudo de caso na automotiva

Local de origem dos dados:	Empresa montadora de veículo <i>marca 2</i>			Produto estudado:	Válvulas de motor	Fluxo de referência (FR):	4 válvulas de escape (176,4 g)
Tratamentos	Requisitos técnicos de qualidade do produto (destacados na seção F.2 do Apêndice D)			Correlação dos RTQP com as etapas do ciclo de vida a jusante da manufatura			
				Etapas afetadas	Aspectos ambientais afetados	Quantificação dos aspectos afetados	
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	0,90 ± 0,04	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	17.170,00 ± 0,02
					Consumo de válvulas	peças	4,4 ± 0,02
	Diâmetro final da haste	mm	5,61 ± 0,01		Consumo de gasolina	kg	17.000,00 ± 0,02
	Circularidade RONT da haste	µm	15,78 ± 0,01		Consumo de válvulas	peças	4,4 ± 0,02
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	0,93 ± 0,02	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	17.170,00 ± 0,02
					Consumo de válvulas	peças	4,4 ± 0,02
	Diâmetro final da haste	mm	5,73 ± 0,02		Consumo de gasolina	kg	17.510,00 ± 0,02
	Circularidade RONT da haste	µm	15,80 ± 0,02		Consumo de válvulas	peças	4,4 ± 0,02
Nº passes = 2; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	1,42 ± 0,02	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	17.170,00 ± 0,02
					Consumo de válvulas	peças	4,4 ± 0,02
	Diâmetro final da haste	mm	5,74 ± 0,02		Consumo de gasolina	kg	17.510,00 ± 0,02
	Circularidade RONT da haste	µm	16,00 ± 0,75		Consumo de válvulas	peças	4,4 ± 0,02
Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	0,46 ± 0,03	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	17.000,00 ± 0,02
					Consumo de válvulas	peças	4,0 ± 0,01
	Diâmetro final da haste	mm	5,62 ± 0,01		Consumo de gasolina	kg	17.000,00 ± 0,02
	Circularidade RONT da haste	µm	10,59 ± 0,51		Consumo de válvulas	peças	4,0 ± 0,01
Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	0,90 ± 0,01	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	17.170,00 ± 0,02
					Consumo de válvulas	peças	4,4 ± 0,02
	Diâmetro final da haste	mm	5,62 ± 0,02		Consumo de gasolina	kg	17.000,00 ± 0,02
	Circularidade RONT da haste	µm	13,00 ± 2,19		Consumo de válvulas	peças	4,0 ± 0,02

Nº passes = 4; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	$0,89 \pm 0,03$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,61 \pm 0,55$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	µm	$14,00 \pm 0,71$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	$0,43 \pm 0,02$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,61 \pm 0,08$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	µm	$9,56 \pm 0,11$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	$0,30 \pm 0,02$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,01$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	µm	$10,00 \pm 0,47$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
Nº passes = 6; Vazão = 18,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	$0,45 \pm 0,02$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,01$		Consumo de gasolina		$17.000,00 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	µm	$11,75 \pm 0,17$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	$0,93 \pm 0,04$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	Mm	$5,61 \pm 0,01$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	µm	$14,40 \pm 0,66$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Rugosidade Ra da haste	µm	$0,96 \pm 0,02$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,09$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	µm	$15,00 \pm 2,71$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 2;	Rugosidade Ra da haste	µm	$1,00 \pm 0,14$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,02$

Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,74 \pm 0,28$		Consumo de gasolina	kg	$17.510,00 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	μm	$14,40 \pm 1,56$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 2; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$1,00 \pm 0,14$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,64 \pm 0,28$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	μm	$14,40 \pm 1,56$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,35 \pm 0,07$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,61 \pm 0,22$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	μm	$9,85 \pm 0,13$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,76 \pm 0,04$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,61 \pm 0,33$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	μm	$9,91 \pm 0,71$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 4; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,80 \pm 0,02$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,02$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	μm	$13,10 \pm 0,76$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,00$
Nº passes = 6; Vazão = 25,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,65 \pm 0,08$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,61 \pm 0,10$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	μm	$10,05 \pm 0,10$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
Nº passes = 6; Vazão = 25,0	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,27 \pm 0,05$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$

1/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,02$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	μm	$9,95 \pm 0,07$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
Nº passes = 6; Vazão = 25,0 1/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,33 \pm 0,05$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,02$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	μm	$12,10 \pm 0,16$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 1/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,66 \pm 0,06$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,60 \pm 0,01$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	μm	$13,22 \pm 0,21$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 1/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,79 \pm 0,03$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,73 \pm 0,02$		Consumo de gasolina	kg	$17.510,00 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	μm	$13,80 \pm 0,34$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 2; Vazão = 36,0 1/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,88 \pm 0,07$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,01$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	μm	$13,65 \pm 0,04$		Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
Nº passes = 4; Vazão = 36,0 1/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,46 \pm 0,01$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,01$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,61 \pm 0,02$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
	Circularidade RONT da haste	μm	$9,78 \pm 0,11$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,01$
Nº passes = 4; Vazão = 36,0	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,63 \pm 0,08$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,01$

l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,03$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
	Circularidade RONT da haste	μm	$12,70 \pm 0,11$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,01$
Nº passes = 4; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,95 \pm 0,06$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,01$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,01$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,72 \pm 0,06$		Consumo de gasolina	kg	$17.510,00 \pm 0,02$
	Circularidade RONT da haste	μm	$13,00 \pm 0,10$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,01$
Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,3 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,46 \pm 0,02$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,60 \pm 0,07$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
	Circularidade RONT da haste	μm	$8,17 \pm 0,10$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,01$
Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 0,8 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,32 \pm 0,02$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
					Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,62 \pm 0,09$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,00$
	Circularidade RONT da haste	μm	$12,09 \pm 0,20$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,01$
Nº passes = 6; Vazão = 36,0 l/min; Velocidade = 1,6 cm/s	Rugosidade Ra da haste	μm	$0,89 \pm 0,01$	Uso 2	Consumo de gasolina	kg	$17.170,00 \pm 0,02$
					Consumo de válvulas	peças	$4,4 \pm 0,02$
	Diâmetro final da haste	mm	$5,61 \pm 0,00$		Consumo de gasolina	kg	$17.000,00 \pm 0,01$
	Circularidade RONT da haste	μm	$12,85 \pm 0,01$		Consumo de válvulas	peças	$4,0 \pm 0,00$

Fonte: elaborado pelo autor

ANEXO A – Folha de coleta de dados para realização do ICV

Preenchido por:		Data do preenchimento:		
Identificação do processo elementar:		Local de origem dos dados:		
Período de tempo:		Mês de início:		Mês de término:
Descrição do processo elementar: (anexar folhas adicionais se necessário)			Local de origem dos dados:	
Consumo de recursos energéticos	Unidade	Quantidade	Descrição dos procedimentos de amostragem	Origem
Consumo de recursos materiais	Unidade	Quantidade	Descrição dos procedimentos de amostragem	Origem
Emissões ao ar	Unidade	Quantidade	Descrição dos procedimentos de amostragem	Origem
Emissões a água	Unidade	Quantidade	Descrição dos procedimentos de amostragem	Origem
Emissões ao solo	Unidade	Quantidade	Descrição dos procedimentos de amostragem	Origem
Saídas de produtos e de outras liberações	Unidade	Quantidade	Descrição dos procedimentos de amostragem	Origem

Quadro 63– Exemplo de folha para coleta de dados durante o ICV

Fonte: Adaptado de ABNT (2009b)