



COPPE/UFRJ

EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA DOS DORMENTES DE FERROVIA DE
MADEIRA NATURAL E DE MADEIRA PLÁSTICA NO BRASIL E NA ALEMANHA COM
BASE NOS SEUS CICLOS DE VIDA

Ana Claudia Nioac de Salles

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador(es): Luiz Pinguelli Rosa

Luiz Fernando Loureiro

Legey

Elen Beatriz Acordi

Vasques Pacheco

Rio de Janeiro

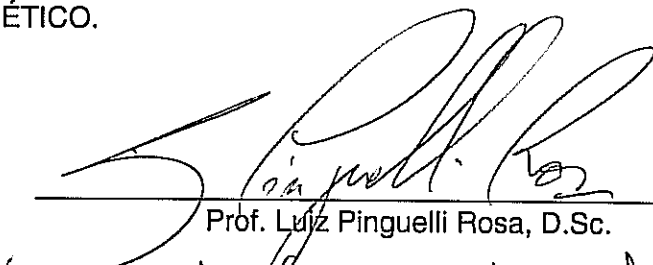
Maio de 2009

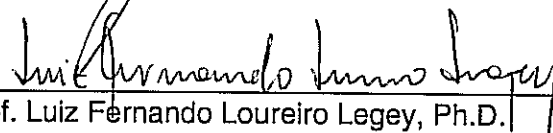
EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA DOS DORMENTES DE FERROVIA DE
MADEIRA NATURAL E DE MADEIRA PLÁSTICA NO BRASIL E NA ALEMANHA COM
BASE NOS SEUS CICLOS DE VIDA

Ana Claudia Nioac de Salles

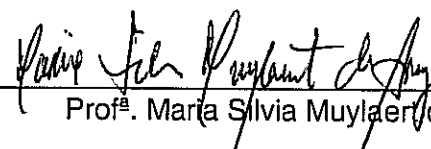
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM
PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

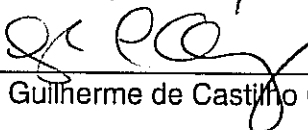
Aprovada por:


Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.


Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph.D.


Profª. Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, Ph.D.


Profª. Maria Sílvia Muylaert de Araújo, D.Sc.


Dr. Guilherme de Castilho Queiroz, D.Sc.


Dr. Sílvia Carlos Aníbal de Almeida, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2009

Salles, Ana Claudia Nioac de

Emissões de Gases do Efeito Estufa dos Dormentes de Ferrovia de Madeira Natural e de Madeira Plástica no Brasil e na Alemanha com Base nos seus Ciclos de Vida / Ana Claudia Nioac de Salles. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XVII, 201 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luiz Pinguelli Rosa

Luiz Fernando Loureiro Legey

Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 156-170.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Madeira plástica. 3. Dormente de ferrovia. 4. Emissão de gases de efeito estufa. 5. Brasil e Alemanha. I. Rosa, Luiz Pinguelli, et al.. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

A todos que acreditam que suas ações
individuais fazem diferença na luta pela
preservação do meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Luiz Pinguelli Rosa, pelos ensinamentos e pelas oportunidades de pesquisa, contribuindo para o desenvolvimento desta tese e para a minha formação profissional.

Ao Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, que me acompanha desde o mestrado e que muito me ensinou em todos esses anos juntos, ajudando a enxergar os sinais para aproveitar as oportunidades.

À Prof^a. Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, pelo conhecimento transmitido ao longo do desenvolvimento desta tese e pela dedicação e motivação para sua realização.

À Prof^a. Maria Sylvia Muylaert de Araújo, pelas oportunidades de pesquisa que contribuíram para elaboração desta tese e pelas suas contribuições na defesa do projeto.

Ao Prof. Silvio Carlos Aníbal de Almeida, pelas suas sugestões e discussões na defesa do projeto.

Ao pesquisador científico do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Guilherme de Castilho Queiroz, pelos esclarecimentos e discussões sobre Avaliação do Ciclo de Vida.

Aos professores do PPE, pelos ensinamentos no decorrer das aulas.

Ao CNPq e à ANP, órgãos de fomento à pesquisa que me proporcionaram apoio financeiro para execução deste trabalho;

Ao DAAD, responsável pela minha bolsa na Alemanha, momento de crescimento pessoal e profissional.

A todos da recicladora Wisewood, cujo apoio ao projeto de madeira plástica do IMA/UFRJ me abriu as portas da empresa, disponibilizando informações que contribuíram para a realização desta tese.

Ao diretor de departamento de engenharia ambiental do *Fraunhofer Institut für Chemische Technologie*, Jörg Woidasky, pela oportunidade de trabalho e de crescimento profissional, e aos colegas Gudrun Gräbe, Dr. Schaefer, Jens Forberger, Hendrick Buddenberg e Beatrice Tübke, pelas discussões e visitas às empresas ao longo da elaboração desta pesquisa.

Às empresas NGR Recycling Machines, PAV Recyclate e Nehlsen, parceiras do projeto *RailWaste*, e às empresas visitadas Wülknitz, Jakob Becker e Echtler, pelo fornecimento das informações referentes à Alemanha.

À empresa Supervia, em especial Maria Dulce Araújo de Castro e João Bosco, à empresa Alberoni e Arruda e à equipe da via permanente da MRS logística, pelas visitas concedidas, contribuindo com o fornecimento de informações e esclarecimentos sobre o setor ferroviário.

Ao Alexandrino de Alencar, diretor da Odebrecht, pela oportunidade de conhecimento da área de polímeros.

Ao Rafael, companheiro que escolhi para dividir meus sonhos, conquistas e desafios, por toda ajuda e amor.

Aos meus pais, pelo exemplo de vida, sempre presentes e acreditando no meu potencial.

Aos meus irmãos, cunhados e sogros, que sempre torceram por mim.

À Rachel Martins Henriques, por todas as conversas, sonhos compartilhados, almoços acadêmicos e coincidências da vida.

Às colegas do IMA/UFRJ, Luciana Portal e Flavia Pinheiro Faria, companheiras nos estudos de madeira plástica.

Aos amigos, pelo carinho e apoio.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

EMISSIONES DE GASES DO EFEITO ESTUFA DOS DORMENTES DE MADEIRA
NATURAL E DE MADEIRA PLÁSTICA NO BRASIL E NA ALEMANHA COM BASE
NOS SEUS CICLOS DE VIDA

Ana Claudia Nioac de Salles

Maio/2009

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa

Luiz Fernando Loureiro Legey

Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco

Programa: Planejamento Energético

Esta tese apresenta uma análise das emissões de gases de efeito estufa dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica, no Brasil e na Alemanha, com base nos seus ciclos de vida. A metodologia “Avaliação do Ciclo de Vida” foi utilizada com o propósito de realizar um balanço dos recursos consumidos ao longo de todo o processo produtivo dos dormentes, até a sua destinação final. Foram construídos vinte e quatro cenários para analisar o impacto de determinados parâmetros (como a vida útil), nas emissões atmosféricas durante o ciclo de vida dos dormentes, além de diferentes hipóteses (como a consideração ou não da madeira natural como uma matéria-prima carbono-neutro e alternativas de destinação final dos dormentes). Verificou-se que as emissões de gases de efeito estufa variam expressivamente em cada um dos cenários e, portanto, tais hipóteses devem ser levadas em consideração nos processos de tomada de decisão. Com efeito, em oito cenários para o Brasil e nove cenários para a Alemanha, a madeira plástica foi indicada como a matéria-prima com menor emissão de gases de efeito estufa para fabricação dos dormentes de ferrovia. A partir da Análise de Cenários foi possível também identificar a situação mais otimista e pessimista em termos de emissões de gases de efeito estufa.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

GREENHOUSE GASES EMISSIONS OF THE WOOD AND PLASTIC LUMBER
RAILWAY SLEEPERS IN BRAZIL AND IN GERMANY BASED ON THEIR LIFE
CYCLE

Ana Claudia Nioac de Salles

May/2009

Advisors: Luiz Pinguelli Rosa

Luiz Fernando Loureiro Legey

Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco

Department: Energy Planning

This thesis presents an analysis of the greenhouse gases emissions of wood and plastic lumber railway sleepers, in Brazil and in Germany, based on their life cycle. The "Life Cycle Assessment" tool was used for the purpose of achieving a balance of the resources consumed throughout the sleepers' production process until their final destination. Twenty-four scenarios were conceived to examine the impact of certain parameters (such as lifetime) in air emissions over the life cycle of the sleepers, as well as different assumptions (such as the consideration or not of the wood as a carbon-neutral raw material and different final disposal solutions for the sleepers). It was observed that the emissions of greenhouse gases vary significantly according to the scenario and that these different assumptions must be taken into account in decision making processes. Indeed, in eight scenarios for Brazil and nine scenarios for Germany, the plastic lumber was identified as the raw material with the lowest emissions of greenhouse gases for the manufacturing of railway sleepers. From the Scenarios Analysis, it was also possible to identify the most optimistic and pessimistic scenarios in terms of greenhouse gases emissions.

SUMÁRIO

Abreviações.....	xvii
1 Introdução	1
2 Objetivo	6
3 Revisão Bibliográfica.....	8
3.1 Origem e Desenvolvimento da Madeira Plástica	8
3.2 Mercado Mundial dos Dormentes de Ferrovias Feitos de Plástico.....	10
3.3 Mercado do Dормente de Ferrovias	20
3.3.1 No Brasil.....	20
3.3.2 Na Alemanha	29
3.4 Mercado dos Resíduos Plásticos.....	31
3.4.1 No Brasil.....	31
3.4.2 Na Alemanha	34
3.5 Avaliação do Ciclo de Vida	39
3.5.1 Definição	39
3.5.2 Normas.....	39
3.5.3 Software e Base de dados	42
3.5.4 Pesquisas e Estudos.....	45
4 Metodologia do Estudo da Avaliação do Ciclo de Vida dos Dormentes.....	54
4.1 Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida.....	54
4.2 Definição do objetivo e do escopo – Fase 1	56
4.2.1 Público-alvo.....	56
4.2.2 Descrição do produto	57
4.2.3 Sistema de produto e Fronteira do sistema de produto	61
4.2.4 Unidade funcional	71
4.2.5 Software de Avaliação do Ciclo de Vida	72
4.2.6 Levantamento de dados para Fase 2 (ICV)	72
4.2.7 Categorias de impacto ambiental para Fase 3 (AICV).....	80
4.2.8 Apresentação dos resultados das Fases 2, 3 e 4	83
5 Resultados	87
5.1 Potencial de Resíduo Plástico Disponível	87
5.1.1 Brasil	87
5.1.2 Alemanha	88
5.2 Inventário do Ciclo de Vida dos dormentes – Fase 2	90
5.2.1 ICV - Brasil	90
5.2.2 ICV - Alemanha.....	97

5.2.3	ICV Brasil e Alemanha – Unidade funcional	105
5.3	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida dos dormentes - Fase 3.....	106
5.3.1	AICV - Brasil.....	106
5.3.2	AICV - Alemanha	108
5.3.3	Análise comparativa das emissões de GEE dos ICVs.....	110
5.4	Interpretação do Ciclo de Vida dos dormentes - Fase 4.....	114
5.4.1	Análise de Cenários - Brasil.....	115
5.4.2	Análise de Cenários - Alemanha.....	127
5.4.3	Resumo da Análise de Cenários.....	137
5.4.4	Considerações	145
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	151
	Referências Bibliográficas	156
	Anexos.....	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Poliuretano com fibra de vidro usado na fabricação de dormentes ferroviários.....	15
Figura 2 – Dormente de Poliuretano da Sekisui.....	15
Figura 3 – Dormente de madeira plástica da Wisewood.....	17
Figura 4 – Dormente de madeira plástica da Wisewood instalado na ferrovia da MRS Logística.....	18
Figura 5 – Elementos da via permanente.....	21
Figura 6 – Ferrovias no Brasil - 2008.....	25
Figura 7 – Dormente de madeira tratada com creosoto.....	30
Figura 8 – Ferrovias na Alemanha.....	31
Figura 9 – Composição média do lixo coletado no Brasil (% em massa).....	32
Figura 10 – Logo “O Ponto Verde” do <i>Dual System Deutschland</i>	36
Figura 11 – Local de depósito de material separado em uma unidade de triagem na Alemanha.....	36
Figura 12 – Produção e consumo dos resíduos plásticos na Alemanha.....	37
Figura 13 - Composição média do lixo coletado na Alemanha (% em massa).....	38
Figura 14 – Geração e disposição final dos resíduos plásticos na Alemanha (em milhões de toneladas).....	38
Figura 15 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida.....	54
Figura 16 – Alburno (parte mais branca) e cerne do Carvalho (parte mais escura).....	58
Figura 17 – “Plano de processo” do GaBi com as sete etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema do dormente de madeira natural no Brasil.....	63
Figura 18 – “Plano de processo” do GaBi com as seis etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema do dormente de madeira plástica no Brasil.....	65
Figura 19 – “Plano de processo” do GaBi com as sete etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema do dormente de madeira natural na Alemanha.....	68
Figura 20 – “Plano de processo” do GaBi com as seis etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema do dormente de madeira plástica na Alemanha.....	70
Figura 21 – Emissões totais (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil.....	91
Figura 22 – Emissões para atmosfera (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil.....	92
Figura 23 - Emissões totais (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil.....	95

Figura 24 - Emissões para atmosfera (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil	96
Figura 25 – Emissões totais (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha.....	98
Figura 26 – Emissões para atmosfera (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha	100
Figura 27 - Emissões totais (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha.....	102
Figura 28 - Emissões para atmosfera (<i>outputs</i>) dos dormentes de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha	103
Figura 29 – Contribuição das emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira natural no Brasil e na Alemanha	113
Figura 30 – Contribuição das emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira plástica no Brasil e na Alemanha.....	113
Figura 31 – Brasil: 12 Cenários de emissão de gases de efeito estufa por unidade de dormente de madeira natural e de madeira plástica (kgCO ₂ e).....	140
Figura 32 - Alemanha: 12 Cenários de emissão de gases de efeito estufa por unidade de dormente de madeira natural e de madeira plástica (kgCO ₂ e).....	141
Figura 33 – Cenário 8: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Brasil	142
Figura 34 – Cenário 23: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Alemanha.....	142
Figura 35 - Cenário 10: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Brasil	143
Figura 36 - Cenário 22: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Alemanha.....	144

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Produtores de dormentes de plástico no mundo	18
Tabela 2 - Ferrovias de carga no Brasil.....	22
Tabela 3 - Ferrovias de passageiros no Brasil	24
Tabela 4 – Dimensões do dormente de madeira natural (serrada)	26
Tabela 5 – Vida útil e preço dos dormentes no Brasil	26
Tabela 6 – Características dos dormentes de ferrovia	27
Tabela 7 – Vida útil e preço dos dormentes na Alemanha	30
Tabela 8 - Utilização do plástico por setor no Brasil.....	32
Tabela 9 – Índice de reciclagem mecânica por tipo de plástico pós-consumo	34
Tabela 10 – Aquisição dos dados para a elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida do estudo em questão	76
Tabela 11 – Emissão para o ar do creosoto (kg).....	79
Tabela 12 - Potencial de reaproveitamento de PEAD no Brasil em 2005	88
Tabela 13 - Potencial de reaproveitamento de PEAD na Alemanha em 2005.....	89
Tabela 14 – Emissões dos dormentes de madeira natural em cada etapa de seu ciclo de vida considerando a sua queima no final do tempo de uso – Brasil.....	92
Tabela 15 – Emissão por unidade de dormente de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil	93
Tabela 16 - Emissão por unidade de dormente de madeira natural não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil.....	94
Tabela 17 – Emissões dos dormentes de madeira plástica em cada etapa de seu ciclo de vida não considerando a sua queima no final do tempo de uso – Brasil.....	95
Tabela 18 – Emissão por unidade de dormente de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil.....	96
Tabela 19 – Emissão por unidade de dormente de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil.....	97
Tabela 20 – Emissões dos dormentes de madeira natural em cada etapa do ciclo de vida considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha	99
Tabela 21 – Emissão por unidade de dormente de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha	100
Tabela 22 – Emissão por unidade de dormente de madeira natural não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha	101
Tabela 23 – Emissões dos dormentes de madeira plástica em cada etapa do ciclo de vida considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha	103

Tabela 24 – Emissão por unidade de dormente de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha	104
Tabela 25 - Emissão por unidade de dormente de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha	104
Tabela 26 - Emissão por quilômetro de ferrovia considerando a vida útil dos dormentes - Brasil.....	105
Tabela 27 - Emissão por quilômetro de ferrovia considerando a vida útil dos dormentes - Alemanha	106
Tabela 28 – Valoração das categorias de impacto ambiental para cada dormente -	107
Tabela 29 – Valoração das categorias de impacto ambiental para cada dormente – Alemanha.....	109
Tabela 30 – Emissão de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira natural no Brasil e na Alemanha (tCO ₂ e).....	110
Tabela 31 – Emissão de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira plástica no Brasil e na Alemanha (tCO ₂ e)	112
Tabela 32 – Cenário 1: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico - Brasil	116
Tabela 33 – Cenário 2: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira natural e não do plástico, sendo a madeira C-neutro - Brasil	117
Tabela 34 – Cenário 3: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico - Brasil.....	117
Tabela 35 – Cenário 4: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro - Brasil	118
Tabela 36 – Cenário 5: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica - Brasil.....	120
Tabela 37 – Cenário 6: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro - Brasil.....	121
Tabela 38 – Cenário 7: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais – Brasil.....	122
Tabela 39 – Cenário 8: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes - Brasil.....	123

Tabela 40 – Emissão <i>per capita</i> anual de algumas regiões e a sua relação com o número de habitantes referentes ao cenário padrão brasileiro	124
Tabela 41 – Cenário 9: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Brasil.....	125
Tabela 42 – Cenário 10: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes - Brasil	126
Tabela 43 – Cenário 11: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Brasil.....	126
Tabela 44 – Cenário 12: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes – Brasil.....	127
Tabela 45 – Cenário 13: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico - Alemanha.....	128
Tabela 46 – Cenário 14: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico, sendo a madeira C-neutro - Alemanha.....	129
Tabela 47 – Cenário 15: Comparação das emissões de por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico - Alemanha.....	129
Tabela 48 – Cenário 16: Comparação das emissões de por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro - Alemanha.....	130
Tabela 49 – Cenário 17: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica - Alemanha.....	131
Tabela 50 – Cenário 18: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro - Alemanha.....	132
Tabela 51 – Cenário 19: Comparação das emissões de cada dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais – Alemanha	133
Tabela 52 – Cenário 20: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes - Alemanha.....	134

Tabela 53 – Cenário 21: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Alemanha.....	134
Tabela 54 – Cenário 22: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes - Alemanha.....	135
Tabela 55 – Cenário 23: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Alemanha	136
Tabela 56 – Cenário 24: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes – Alemanha.....	137
Tabela 57 – Emissões de gases de efeito estufa por unidade de dormente de madeira natural e de madeira plástica segundo os 24 cenários (kgCO ₂ e).....	138
Tabela 58 – Intervalo das emissões de gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	145

Abreviações

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AICV - Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

AMV - Aparelho de Mudança de Via

AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem

CO₂e – Dióxido de carbono equivalente

C-neutro - Carbono-neutro

GaBi - *Ganzheitliche Bilanzierung*

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

ICV - Inventário do Ciclo de Vida

IRmP - Indústria de Reciclagem Mecânica dos Plásticos no Brasil

PAH - Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

PC - Poder Calorífico

PE – Polietileno

PEAD - Polietileno de alta densidade

PEBD - Polietileno de baixa densidade

PELBD - Polietileno linear de baixa densidade

PLTA - *Plastic Lumber Trade Association*

PP – Polipropileno

PS - Poliestireno

PU - Poliuretano

PVC - Poli(cloreto de vinila)

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

t - Tonelada

1 Introdução

A introdução da tese é dividida em duas partes: na primeira são apresentadas as considerações nas quais o trabalho se baseou; e na segunda, é descrita a estrutura da dissertação.

Considerações Gerais

Atualmente, os temas ambientais sobre o aumento da temperatura global, a degradação do meio ambiente e a problemática da disposição final dos resíduos, entre outros, estão cada vez mais difundidos. No entanto, muitas ações ainda têm que ser realizadas para que os danos causados ao meio ambiente sofram reduções efetivas.

Para um melhor entendimento das questões ambientais que envolvem consumo de recursos, por exemplo, é preciso uma avaliação mais detalhada dos produtos e serviços que são consumidos pela sociedade. Para que se possa reduzir o desperdício desses recursos e os impactos ambientais por eles provocados, é preciso um maior conhecimento das emissões decorrentes da extração das matérias-primas para sua fabricação, do seu uso e do seu destino final. Essa é justamente uma das funções da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Essa ferramenta, cuja utilização já é prevista na norma ISO 14000, possibilita o levantamento e a avaliação dos potenciais impactos ambientais de um determinado produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida a partir do seu balanço de massa e de energia, identificando os impactos ambientais ocorridos em cada etapa desse ciclo. Essa visão holística permite a comparação desde a extração das matérias-primas, passando pela produção, transporte e uso, até a disposição final dos produtos analisados. De posse dessas informações detalhadas, o produtor pode procurar reduzir cada vez mais o impacto do ciclo de vida dos seus produtos e o consumidor pode optar por consumir produtos e serviços que menos impactem negativamente o meio ambiente, tendo uma consciência maior dos seus hábitos e ações. Como todos os atores são responsáveis pela conservação do meio ambiente, uma melhor compreensão do que a sociedade consome pode contribuir para minimizar as emissões para o ar, para a água e para o solo, auxiliando, ainda, a tomada de decisões na elaboração de políticas públicas e empresariais, enriquecendo as discussões com relação às questões ambientais.

A tese, assim, envolve principalmente três questões ambientais: (i) gerenciamento de resíduos plásticos; (ii) desmatamento; e (iii) aumento da temperatura global, além da abordagem sobre ferrovias.

Gerenciamento de resíduos plásticos

O crescimento da população mundial, aliado ao aumento da produção e do consumo de bens feitos de variados tipos de materiais (plásticos, celulósicos etc.), intensifica o descarte de materiais, exigindo gerenciamento e tratamento adequado para garantir que a sua coleta e disposição final causem o menor impacto ambiental possível. Alguns países - e até mesmo as grandes cidades, como o Rio de Janeiro - ainda têm que enfrentar questões como a falta de espaço físico, principalmente para a construção ou a expansão dos aterros, de recursos financeiros e o aumento das exigências dos órgãos ambientais.

Os plásticos são empregados nos mais diversos setores, sendo os de bens de consumo semi e não-duráveis (como produtos de limpeza e utilidades domésticas) os principais deles, com breve período de uso, o que acelera o seu descarte.

No Brasil, apenas 20% dos resíduos plásticos são reciclados mecanicamente (i.e. convertidos em grânulos que podem ser utilizados para fabricação de novos produtos) e 80% são descartados em aterros e lixões (PLASTIVIDA, 2008). Na Alemanha, 82% dos resíduos plásticos são reciclados, sendo 37% para reciclagem mecânica e 33% para reciclagem energética (incineração dos materiais para recuperação de energia), e 18% são estocados ou depositados em aterros (CONSULTIC, 2005).

Desmatamento

O crescente desmatamento, seja para construção de infra-estrutura ou conversão de áreas de cultivo e de pastagem, tem alterado a geografia de algumas regiões do planeta. A maioria dos países já destruiu quase toda a sua cobertura florestal original e muitos dos que ainda a possuem, enfrentam graves problemas de falta de práticas sustentáveis de exploração desses recursos. É o caso do Brasil. Além de agravar o efeito estufa e as chuvas ácidas, esse processo interfere no equilíbrio e na composição da fauna e da flora locais e contribui para a poluição da água e do ar. A remoção da vegetação que cobre o solo conduz ao aumento da vulnerabilidade à erosão e à redução das chuvas - decorrente da menor devolução de água para a

atmosfera sob forma de umidade - podendo acarretar a desertificação ou empobrecimento do solo de uma determinada região.

O desmatamento na Floresta Amazônica brasileira é relativamente recente. Até a inauguração da rodovia Transamazônica, em 1970, ela estava praticamente intacta. Desde então, as ações humanas, embora variadas de ano para ano, têm desflorestado grandes áreas muito rapidamente. Os dados estimados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) revelam que o total da área desmatada desde 1977 até 2005 foi de 572.766 km², correspondendo a cerca de 11% da Amazônia Legal¹. A média anual de desmatamento de 20 mil km² é um pouco menor do que o Estado de Sergipe e o acumulado nesses 28 anos equivale à extensão territorial da região sul do Brasil (INPE, 2005).

Ainda que a Floresta Amazônica seja desmatada por diversas razões, principalmente pelo uso madeireiro predatório, pela expansão da agropecuária e pelos incêndios florestais, o foco do trabalho é a preocupação com o corte das árvores destinadas para a indústria de dormentes de ferrovias.

Já na Alemanha, a floresta original de 8 mil anos atrás, que cobria 93% do território, não existe mais. Portanto, o total da área florestada daquele país registrado no ano 2000, equivalente a 30% de todo o território (ou 10.740 mil de 35.698 mil hectares), foi totalmente reflorestada (EARTHTRENDS, 2003).

Aquecimento global

O aquecimento global se deve a causas naturais e antropogênicas devido ao aumento da liberação dos gases de efeito estufa². As atividades humanas alteraram o clima do planeta em várias dimensões. Inicialmente, os efeitos foram significantes em escala regional ou local. Acredita-se que, desde a Revolução Industrial, as atividades humanas atingiram tal ponto que de fato começaram a alterar o clima do planeta em escala global.

No que tange às questões relativas às ações do homem, dentre as diversas atividades que contribuem para o agravamento do aquecimento global, se destacam o desmatamento e a queima de combustíveis fósseis que têm provocado o aumento das

¹ A Amazônia Legal inclui o Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e parte do Maranhão, totalizando cerca de 5.217.423 km², representando aproximadamente 61% do território brasileiro (MMA, 2009).

² Alguns dos gases causadores do efeito estufa são: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoreto de enxofre (SF₆), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorcarbonos (PFCs) (IPCC, 2006).

emissões do dióxido de carbono (CO₂); as plantações de arroz (cultivadas em solos molhados), e a criação de animais (devido à fermentação entérica dos herbívoros), que mais têm contribuído para o aumento das emissões de metano (CH₄); e o uso de ar condicionado, refrigeradores, solventes e sprays que contribuem para o aumento dos gases clorofluorcarbonetos (CFCs).

O aumento da temperatura da Terra acelera o derretimento das calotas polares, a elevação do nível dos oceanos, o aumento da frequência e da intensidade de inundações e secas, entre outras consequências.

Em um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida é possível quantificar as emissões de gases de efeito estufa ocorridas ao longo de todo o ciclo de vida de um determinado produto, a partir da contabilização dos fluxos de massa e de energia consumidos em todas as etapas. Permitindo, assim, a comparação entre produtos semelhantes ou de diferentes matérias-primas para fabricação do mesmo produto, a fim de possibilitar a escolha por aqueles que menos influenciam negativamente o meio ambiente.

Ferrovias

No Brasil, as ferrovias começaram a ser privatizadas nos anos de 1990 com o Plano Nacional de Desestatização instituído pelo Governo Federal. O Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do atual governo visa investir em quatro anos um total de R\$ 503,9 bilhões nas áreas de transporte, energia, saneamento, habitação e recursos hídricos, incluindo a construção e a recuperação de 2.518 quilômetros de ferrovias (ou seja, a instalação de cerca de 4,3 milhões de dormente de ferrovia) (PAC, 2009).

A Deutsche Bahn AG é a empresa ferroviária mais importante da Alemanha. Em 2007, ela anunciou um amplo programa de reforma e manutenção de 87% da sua malha ferroviária ao longo de três anos, o "ProNetz", no qual uma das medidas propostas é a aplicação de técnicas e produtos inovadores na construção de linhas férreas, como os dormentes feitos a partir de plásticos reciclados (FRAUNHOFER, 2008).

Estrutura da tese

No capítulo 2 são apresentados os objetivos geral e específicos da tese.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica da origem e do desenvolvimento do mercado da madeira plástica no mundo. Em seguida, é apresentado o mercado

mundial dos dormentes ferroviários feitos de plástico, dando ênfase ao mercado brasileiro e alemão, e identificando as principais características de quatro matérias-primas (madeira natural, madeira plástica, concreto e aço) para fabricação dos dormentes ferroviários. Além disso, é analisado o gerenciamento dos resíduos plásticos no Brasil e na Alemanha. Por fim, é descrita a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida, abordando sua definição, normas envolvidas, *softwares*, banco de dados e estudos desenvolvidos.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia do trabalho do estudo de Avaliação do Ciclo de Vida dos dormentes de ferrovia de madeira natural e madeira plástica no Brasil e na Alemanha. Inicialmente, é apresentada a estrutura da ACV. Em seguida, explica-se como foi feita a elaboração do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dos dormentes, detalhando o escopo do estudo. Essa etapa inclui a descrição do produto, do sistema do produto e a sua fronteira, dos parâmetros escolhidos, o público-alvo, a unidade funcional, o *software* de ACV utilizado, as categorias de impactos a serem avaliadas e as hipóteses assumidas. Também são apresentados os procedimentos e as considerações feitas para a coleta e a aplicação da base de dados nos dois países.

O Capítulo 5 é o de resultados. Nele é demonstrado o potencial de plástico disponível no Brasil e na Alemanha para fabricação de dormentes de madeira plástica. Em seguida, são apresentados os resultados dos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes. Posteriormente, é feita a Avaliação de Impacto Ambiental com base no resultados dos ICVs. Uma vez identificadas as emissões mais significativas, foram construídos 24 cenários, 12 para cada país. Ao final são apresentados um resumo dos cenários e as considerações feitas para elaboração de um estudo de ACV.

Finalmente, o Capítulo 6 contém conclusões referentes aos resultados encontrados no estudo, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 Objetivo

O objetivo desta tese é realizar uma análise das emissões de gases de efeito estufa dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica, no Brasil e na Alemanha, com base nos seus ciclos de vida. A ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida foi utilizada nesta tese a fim de realizar o balanço dos recursos consumidos ao longo de todo o processo produtivo até a disposição final dos dormentes, contribuindo, assim, para o melhor entendimento dos seus aspectos ambientais e suas influências no meio ambiente. Até o presente momento, ainda não foi publicado, na literatura pesquisada, em nenhum jornal ou livro científico, um estudo semelhante ao aqui proposto. Espera-se que a partir deste trabalho seja possível verificar se existe um potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa na substituição da madeira natural pela madeira sintética, originária de resíduos plásticos, como matéria-prima para fabricação de dormentes de ferrovia nos dois países analisados.

A comparação entre dois países, um desenvolvido e outro em desenvolvimento, permite, ainda, um maior conhecimento de como cada um deles trata as questões ambientais apresentadas nesta tese, servindo como exemplo para adaptações e troca de experiências e de idéias para os temas abordados.

A seguir, são listados os objetivos específicos desta tese.

Objetivos específicos

- Verificar a quantidade disponível dos resíduos plásticos que poderia ser destinado para fabricação de dormentes de ferrovia para atender a demanda anual no Brasil e na Alemanha.
- Elaborar quatro Inventários do Ciclo de Vida, dois para dormente de madeira natural e dois para dormente de madeira plástica, no Brasil e na Alemanha.
- Selecionar um *software* de Avaliação do Ciclo de Vida que permita a elaboração desses quatro inventários.
- Verificar, dentre as categorias de impactos ambientais selecionadas no estudo e disponibilizadas no *software* de Avaliação do Ciclo de Vida, as maiores influências ambientais calculadas pelos ICVs dos dormentes de ferrovia nos dois países, principalmente as emissões de gases de efeito estufa.
- Comparar as emissões em cada etapa do ciclo de vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha.

- Construir diversos cenários para avaliar o impacto de determinados parâmetros nas emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida dos dormentes, e de diferentes suposições (como a consideração ou não da madeira natural como uma matéria-prima carbono-neutro e a consideração de diferentes destinações finais desses produtos).
- Analisar as emissões de gases de efeito estufa de cada dormente, ano a ano, ao longo de todo o ciclo de vida elaborado no estudo para o caso brasileiro e alemão.
- Verificar o intervalo dessas emissões de gases de efeito estufa nos quatro Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes no Brasil e na Alemanha, identificando, para cada caso, o cenário mais otimista e pessimista.

3 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado a origem e o desenvolvimento do mercado da madeira plástica no mundo. Em seguida, é descrito o mercado mundial dos dormentes ferroviários feitos de plástico, enfatizando o mercado brasileiro e alemão, e identificadas as principais características de quatro matérias-primas para produção dos dormentes de ferrovia. Também é analisado como é feito o gerenciamento dos resíduos plásticos nos dois países analisados. Finalmente, é descrita a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida, abordando sua definição, estrutura, normas envolvidas, softwares, banco de dados e estudos desenvolvidos.

3.1 Origem e Desenvolvimento da Madeira Plástica

O primeiro desenvolvimento da madeira plástica - produto que apresenta as mesmas utilidades e propriedades da madeira natural - registrado no domínio público data da década de 1970, quando seu processo de fabricação foi desenvolvido na Europa e no Japão. Utilizavam-se, então, como matéria-prima, sucatas plásticas pós-industriais, uma vez que era o único resíduo plástico disponível e barato naquele tempo. No entanto, essa indústria enfrentou dificuldades na competitividade de mercado e acabou fechando no Japão (LAMPO & NOSKER, 1997).

Ainda nos anos 1970, o holandês Eduard Klobbie deu início ao desenvolvimento de um sistema para transformar os resíduos de resina sintética termoplástica em um produto com características semelhantes à madeira. Na década de 1980, algumas empresas passaram a produzir e a utilizar sistemas similares ao de Klobbie para processar diversos tipos de resíduos plásticos e, desde então, diversos processos de reciclagem mecânica de plásticos têm sido desenvolvidos (idem).

Já no final daquela década, principalmente nos Estados Unidos, em virtude da necessidade de reduzir a quantidade de resíduos sólidos urbanos (RSU) nos aterros sanitários devido à falta de espaço físico e ao elevado custo de transporte, a produção de madeira plástica começou a ser considerada como uma das possíveis alternativas à disposição final dos resíduos plásticos nos aterros sanitários (LAMPO *et al.*, 2000).

Inicialmente, a madeira plástica era utilizada como matéria-prima para a fabricação de mesas de piquenique e bancos de jardim. Posteriormente, durante a década de 1990,

foram desenvolvidas tecnologias com a finalidade de produzi-la para substituir a madeira natural em outras estruturas usadas em jardins, como cercas e deques. No entanto, a falta de padrões e de especificações da indústria de estrutura foi vista como uma barreira para a aplicação da madeira plástica, principalmente no setor de construção civil (idem).

Em 1993, foi formada a Associação Comercial de Madeira Plástica (em inglês *Plastic Lumber Trade Association* – PLTA), com o objetivo de determinar os métodos e especificações de testes a serem realizados para classificar os materiais feitos de madeira plástica nos padrões da Sociedade Americana de Testes e Materiais (em inglês *American Society for Testing and Materials* – ASTM). A princípio, a especificação padrão de poliolefinas da ASTM para a fabricação de madeira plástica considera, especificamente, o polietileno de alta densidade (PEAD). No entanto, a madeira plástica também pode ser fabricada usando polipropileno (PP), poliestireno (PS) e poli(cloreto de vinila) (PVC) ou até mesmo acrescentadas fibras naturais ou de vidro e cargas minerais.

Esse produto, confeccionado a partir de resinas sintéticas termoplásticas, além de apresentar propriedades semelhantes às da madeira natural, oferece vantagens em relação a esta por ser mais resistente ao ataque de insetos, à água e à degradação, necessitando, assim, de menor manutenção. Apresenta maior durabilidade, é fácil de limpar com água e sabão, é moldável e impermeável e, ainda, pode ser furada, aparafusada e serrada (CLIMENHAGE, 2003).

Até 1998, a ASTM já dispunha de uma série de padronizações para produtos fabricados com polietileno e fibras de madeira ou reforçados com fibra de vidro como a ASTM D6108 (1997) – *Compressive properties*; ASTM D6109 – *Flexural Properties* (1997); e ASTM D6341 (1998) – *Coefficient of Thermal Expansion*.

Além de definir padrões para madeira plástica, a Comissão da ASTM também desenvolveu as especificações de distribuição e de compra com base no desempenho e no uso final da aplicação do produto. A Comissão definiu a primeira aplicação de madeira plástica para fabricação de deques (ASTM D6662) por se apresentar um dos mercados mais promissores que utilizam poliolefinas como matéria-prima. As questões mais importantes abordadas na ASTM D6662 incluem os limites dimensionais, deflexão, inflamabilidade, propriedades materiais de desenho estrutural, exposição ao ar livre e resistência de escorregamento (DGS, 2008). A metodologia para desenvolver outras formas e/ou composições de madeira plástica pode ser encontrada na norma

ASTM D6662 (2001). A especificação da norma ASTM D6662 define a madeira plástica como sendo um produto fabricado com conteúdo de plástico superior a 50% em massa e que possua genericamente uma seção transversal retangular com dimensões típicas dos produtos de madeira industrializada (ASTM, 2001).

Recentemente, com o desenvolvimento de novas tecnologias, ganho de escala e, conseqüentemente, de custo de fabricação, a madeira plástica também tem sido empregada na produção de outros produtos como telhados, tapumes, janelas, bueiros, brinquedos de playground, dormentes de ferrovia, entre outros (CLIMENHAGE, 2003).

No Brasil, os estudos de reciclagem de plástico em nível acadêmico foram iniciados em 1990, no Instituto de Macromolécula Professora Eloisa Mano (IMA), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Em três anos o instituto desenvolveu a formulação de uma madeira plástica, que consistiu na mistura de polietilenos pós-consumo, cerca de 75% de polietileno de baixa densidade (PEBD) e 25% de polietileno de alta densidade. Também foi registrado no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) o nome de *IMAWOOD*®, material com potencial de aplicação na construção civil e em diversas outras áreas (MARTINS *et al.*, 1999).

3.2 Mercado Mundial dos Dormentes de Ferrovia Feitos de Plástico

A crescente preocupação com relação às questões ambientais aliada à demanda por dormentes estimulada pelos investimentos em linhas férreas no mundo todo, ao final do século XX, incentiva o desenvolvimento de tecnologias alternativas, com o objetivo de prolongar a vida útil dos dormentes tradicionalmente fabricados de madeira natural. O prolongamento do tempo de uso dos dormentes de madeira natural pode ser realizado pela aplicação de pesticidas ou substituí-los utilizando materiais como concreto e aço ou até mesmo materiais descartados, como plástico e borracha de pneu (FARIA, 2006).

Uma das principais vantagens dos dormentes feitos de material plástico é a previsão da vida útil de pelo menos 40 anos em ferrovias de carga pesada. Além de representarem um produto 100% reciclável após o seu uso como dormente, podem ser instalados em vias que utilizam dormentes de madeira natural, são resistentes a elevadas cargas por eixo, suportam grande tensão e apresentam maior flexibilidade

que os de madeira natural. Como são impermeáveis à água e aos efeitos biológicos, suas instalações são adequadas para locais com muitas variações climáticas e umidade. Assim como os dormentes de concreto e de aço, não necessitam ser impregnados com pesticidas (RODRIGUES *et al*, 2007; WISEWOOD, 2008).

O estudo *Vertical Track Modulus in Plastic Composite Tie Test Zones at Fast* realizado pelo Departamento de Transporte Americano (em inglês *U.S. Department of Transportation - DOT*), em 2003, concluiu que em temperaturas elevadas ou baixas, não houve qualquer modificação na geometria do dormente feito de plástico reciclado, nem em seu comportamento ou estrutura (ASSAD, 2007).

No entanto, CHATTREE *et al.* (2007) mencionam que uma das desvantagens, que determina o tempo de vida dos dormentes de madeira plástica é a degradação devido aos raios ultravioleta (UV). A especificação definida pela Associação Americana de Manutenção e Engenharia Ferroviária (*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association – AREMA*) e pela Autoridade de Trânsito de Chicago (*Chicago Transit Authority - CTA*) estabelece que a degradação do material não deve ser superior a 0,076 mm por ano. No relatório preparado por CLIMENHAGE (2003) sobre madeira plástica, é mencionado que uma série de estudos concluiu que a adição de estabilizadores UV e de antioxidantes (como os minerais – fibra de vidro) podem melhorar o desempenho da madeira plástica. Esses estudos perceberam que apesar da exposição aos raios ultravioleta provocar alterações na cor e no brilho da superfície do produto feito de madeira plástica, as suas propriedades mecânicas não sofreram modificações.

A produção em larga escala dos dormentes de madeira plástica foi iniciada no final do século XX, principalmente nos Estados Unidos.

Um dos maiores fabricantes norte americanos de produtos feitos de polietileno de alta densidade reciclado, a empresa *U.S. Plastic Lumber - USPL*, também foi uma das pioneiras na produção de dormentes de PEAD reforçados com fibra de vidro. A pesquisa iniciada em 1994 pela Universidade de *Rutgers* em conjunto com a *Earth Care Products*, o Corpo de Engenharia Civil do Exército Americano (*US Army of Engineers*) e outras empresas desenvolveu uma formulação para dormente, denominado de *DuraTie*, que recebeu patente americana de número 5916932. Já em 1995 a empresa instalou 10 dormentes de plástico intercalados com 20 de madeira na ferrovia *Rose Yard* em Altoona na Pensilvânia nos Estados Unidos. Entre 2001 e 2002 forneceu 30 mil unidades para reconstrução da linha férrea da *Chicago Transit*

Authority (CIC, 2003; NOSKER & RENFREE, 1999). Em mais de 10 anos de testes realizados pela Associação Americana de Tecnologia de Transporte Ferroviário (em inglês *Association of American Railroad Transportation Technology – AAR Transportation Technology*) observou-se que os dormentes continuam em perfeito estado, possibilitando a projeção para mais de 50 anos de vida útil em ferrovias de carga pesada (CM, 2008).

Em 1998, a empresa americana *PolySum Technologies* recebeu a sua primeira patente nos Estados Unidos (de número 5799870) pelo desenvolvimento do dormente feito de material termoplástico, chamado de *Tuff-Sleepers*®. Em 1999, a empresa de transporte americana, *Bonneville Transloaders*, instalou esses dormentes na sua ferrovia de Wyoming. Em 2000, a empresa *New Orleans Regional Transit Authority* (RTA), operada pelo estado de Louisiana, instalou 33 *Tuff-Sleepers* na sua ferrovia de passageiros. A maior rede ferroviária nos Estados Unidos, *Union Pacific*, também os instalou em uma de suas principais linhas no estado de Louisiana. Em 2003, a empresa *PolySum Technologies* recebeu a patente australiana pela tecnologia dos compósitos termoplásticos (POLYSUM, 2008).

Uma das empresas líderes mundiais no desenvolvimento e na fabricação de dormentes feitos de plástico reciclado é a norte americana *TieTek Composite Crossties*, subsidiária da *North American Technologies Group*. Em 1998, a TieTek instalou 250 de seus dormentes na *Union Pacific Railroad*, uma das maiores companhias ferroviárias dos Estados Unidos. Posteriormente, o pedido cresceu para 200 mil unidades para os 6 anos seguintes. Em 1999, a patente norte americana US 5886078 foi concedida para a empresa pelo seu desenvolvimento do processo de manufatura e da fórmula do material usando poliolefinas recicladas, borracha, mica, fibra de vidro e aditivos. Até 2003, já havia conseguido registrar a sua patente em 8 países. Desde 1997 a empresa produz esses dormentes e, até o momento, mais de 1 milhão de unidades estão sendo testadas em diversas vias férreas, incluindo o trecho da Associação Americana de Tecnologia de Transporte Ferroviário em Pueblo. A TieTek estima um tempo de uso de mais de 40 anos para o seu produto, chamado de *SleeperTek*™, que é composto por 85% de material reciclado (garrafas de plástico, sacos de plástico, borrachas de pneus e fibras de vidro), sendo mais de 50% de PEAD, que são combinados com diversas cargas. Em 2007, a *Long Island Rail Road*, uma das mais movimentadas ferrovias americanas instalou os *SleeperTek* intercalados com dormentes de madeira na sucursal *Montauk*. Ao longo da última década, um dos seus clientes, a companhia ferroviária norte americana *Chicago*

Transit Authority substituiu 20% dos seus 650 mil dormentes de madeira pelos da *TieTek* (CIC, 2003; MCCONNELL, 2009; TIETEK, 2008).

Outra empresa americana que participou desde o início do estabelecimento do mercado de dormentes plásticos nos Estados Unidos foi a empresa *Polywood*, que desenvolveu e testou seus produtos também em conjunto com a *US Army of Engineers*, as Universidades de *Rutgers* e de *Illinois* e outras instituições de pesquisas. Seus dormentes são produzidos a partir da mistura de resíduos de polietileno de alta densidade com poliestireno. A empresa ferroviária *Chicago Transit Authority*, que também encomendou os dormentes *DuraTie* e *SleeperTek* como anteriormente apresentado, em 2000, comprou 26.482 unidades da *Polywood* para serem instaladas no ramal *Forest Park* da Linha Azul em Illinois. Em 2002, a CTA comprou mais 40 mil unidades (CIC, 2003). Em 2007, um dos fundadores da *Polywood* criou uma nova empresa, a *Axion International* e a formulação desenvolvida por essa nova empresa mistura quatro tipos de resíduos plásticos (acrílico, poliestireno, policarbonato e polietileno de alta densidade) com fibra de vidro. Em 12 anos de experiência e entre 13 patentes registradas e algumas ainda pendentes, mais de 200 mil dormentes já foram testados em diversas ferrovias, principalmente pela *AAR Transportation Technology* também em Pueblo. Esses dormentes foram testados em 2008 pela Comissão de Trânsito de Toronto (em inglês *Toronto Transit Commission*) no Canadá e apresentaram resultados positivos quando instalados para substituírem os dormentes de concreto e de madeira natural (AXION, 2009; MCCONNELL, 2009).

As empresas *TieTek*, *USPL* e *Polywood*, que desenvolveram as suas formulações em conjunto com universidades e instituições de pesquisa, instalaram nas suas fábricas equipamentos produzidos pela canadense *Superior Polymer Systems*, que desenvolveu um sistema de moldagem especialmente para produção de dormentes ferroviários feitos com polímeros (ASSAD, 2007; SCHUT, 2009).

A empresa norte americana *Recycle Technologies International* (RTI) oferece um dormente feito de até 35% de talco (carga mineral) misturado com resíduo plástico, principalmente de embalagem pós-consumo da atividade agrícola, chamado de *PermaSleeper™*. Assim como as empresas *Permal Wallace* e *Allen Reinforced Plastics*, parceiras no projeto RDSO, a RTI também oferece dormentes com proteção contra radiação ultravioleta (RTI, 2008). Seus dormentes estão sendo testados há 5 anos no trecho da Costa do Golfo pela *Federal Railroad Administration* (MCCONNELL, 2009).

Outra empresa nos Estados Unidos, a *International Track Systems*, oferece dormentes que misturam diversos materiais plásticos de alto desempenho, como polietileno de alta densidade e polietileno de ultra-alto peso molecular. Esses dormentes foram instalados em algumas das maiores ferrovias do mundo, incluindo as de Nova Jersey, de Chicago, de Nova Orleans e de Nova York (ITS, 2008).

A empresa americana *PRT Performance Rail Sleeper* foi a primeira empresa a ganhar uma patente pelo processo de moldagem em molde fendido, reduzindo o tempo de resfriamento dos dormentes feitos de material reciclado (PRT, 2008).

Em 2000, a empresa norte-americana *Primix* instalou seus primeiros protótipos de dormentes em uma ponte da ferrovia do estado de *Connecticut*. Os dormentes foram fabricados a partir de uma mistura de concreto e de aço e revestidos por uma “capa” de plástico e borracha de pneu de pós-consumo (SCHEIBE, 2008).

No Japão, a empresa *Sekisui* desenvolveu um dormente utilizando espuma de Poliuretano (PU) reforçada com longas fibras de vidro, ambos os materiais virgens. Esses dormentes são chamados de *Eslon Neo Lumber FFU (Fiber reinforced foamed urethane)*. O PU é fornecido pela *BaySystems*, empresa da *Bayer MaterialScience* e o dormente é comercializado pela *Sumika Bayer Urethane* (Figura 1) (BAYER, 2008).

Os dormentes de plástico já estão em serviço no Japão há mais tempo. Até 2008, mais de 1,3 milhão desses dormentes sintéticos já foram instalados em quase 900 quilômetros das ferrovias japonesas, como na linha de alta velocidade (*Shinkansen*) em linhas de trens regionais e no metrô, sendo as principais áreas de aplicação em Aparelhos de Mudança de Via³ (AMVs), em estruturas metálicas, em túneis e na linha férrea. Os dormentes se mostraram muito resistentes nas instalações em túneis que se localizam perto do mar, onde às vezes são lavados pela água salgada e expostos a um microclima agressivo. Estima-se que a cada ano 90 mil unidades desses dormentes são instaladas nas ferrovias japonesas.

O ano de 2004 marcou a estréia desse dormente de plástico no mercado europeu com a sua instalação na linha do metrô de Viena, na Áustria, no trecho da ponte *Zollmat*. Desde então, os dormentes FFU têm sido instalados em diversos trechos da ferrovia federal austríaca (ÖBB). A sua aplicação na ferrovia alemã se deu recentemente, em 2008, quando foram instaladas 136 unidades em 74 metros no trecho de mudança de

³ De acordo com a ANTF, Aparelho de Mudança de Via é um conjunto de peças colocadas nas concordâncias de duas linhas para permitir a passagem dos veículos ferroviários de uma para outra. Também denominado de “chave”. Ou seja, é um dispositivo que transfere o trem de uma linha para outra (ANTF, 2009).

via da linha férrea da empresa *Currenta* (subsidiária da *Bayer AG*), localizada no *Chemepark Leverkusen*, a fim de ligar a sua produção com a rede ferroviária alemã (*Deutsche Bahn*). Os dormentes foram produzidos em parceria com a empresa austríaca *voestalpine BWG* (VAE) (*idem*). Os dormentes fornecidos pela empresa *Sekisui* estão ilustrados na Figura 2.



Figura 1 – Poliuretano com fibra de vidro usado na fabricação de dormentes ferroviários

Foto: Ana Claudia Nioac de Salles, International Trade Fair for Transport Technology, Berlim, Alemanha, 2008.



Figura 2 – Dormente de Poliuretano da Sekisui

Foto: Ana Claudia Nioac de Salles, International Trade Fair for Transport Technology, Berlim, Alemanha, 2008.

A empresa alemã *Reluma* em conjunto com o Departamento de Engenharia Civil / Arquitetura da Universidade de Tecnologia e Economia de Dresden (HTW Dresden) na Alemanha, sob orientação do professor Dr. Wolfgang Rank, desenvolveram um dormente utilizando 100% de plástico reciclado - 65% de polipropileno (PP) e 35% de polietileno (PE). Em 2005, esses protótipos registrados como *Relumat 2000®*, foram instalados no terminal *Prohlis* no sistema ferroviário público de Dresden.

Em meados de 2008, o consórcio liderado pelo instituto de pesquisa alemão *Fraunhofer – Institut für Chemische Technologie* (ICT) deu início à pesquisa e desenvolvimento de dormentes feitos a partir de materiais recicláveis com o projeto *Railway Sleepers from Mixed Plastic Wastes - RailWaste*. O instituto é responsável pelo desenvolvimento do composto a partir de resíduos plásticos pós-consumo juntamente com fibra de vidro e agentes auxiliares. Esse projeto, financiado pelo programa da Comunidade Européia *ERA-NET Sustainable Enterprise* (SUSPRISE), está sendo feito em parceria com a empresa austríaca *NGR – Recycling Machines*, responsável pelo desenvolvimento das máquinas e do processo, e com a empresa alemã *PAV – Recyclate*, fornecedora do material pré-processado. A expectativa do tempo de uso do dormente instalado na linha férrea é de 50 anos (FRAUNHOFER, 2008).

No Brasil, o mercado de dormentes de plástico reciclado reforçados com fibras naturais ainda encontra-se incipiente, com poucas empresas testando seus dormentes em linhas ferroviárias brasileiras. A empresa Cogumelo, que oferece a linha Policog com produtos feitos de madeira plástica, foi uma das pioneiras no mercado de dormentes. Foram instalados no metrô de São Paulo e em trechos da ferrovia MRS Logística, empresa que controla e opera a Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal (GLOBONEWS, 2007).

Em 2005, a MRS instalou 20 dormentes de madeira plástica propositalmente em curvas para que fossem observados o sistema de fixação e os seus movimentos longitudinais e laterais. Posteriormente, mais dormentes de plástico reciclado pós-consumo foram instalados perto de dormentes de madeira natural e de aço para que comparações pudessem ser feitas, analisando as mesmas condições para todos os três tipos de matéria-prima. Os trechos escolhidos foram Saudade-Barra do Piraí e na Ferrovia do Aço, segmentos sob operações pesadas de tráfego. Depois de diversas melhoras feitas nos primeiros protótipos, mais 100 unidades foram instaladas em 2006 na sua ferrovia (RODRIGUES *et al.*, 2007).

Em 2007, a empresa brasileira *Ecology Plastic*, que fabrica dormente a partir de plástico reciclado e fibras naturais, iniciou testes com a instalação de seus dormentes nas redes ferroviárias da MRS e da Vale (EP, 2009).

Em dezembro de 2008, a empresa *Wisewood*, instalada no interior de São Paulo, teve seus dormentes de plástico reciclado pós-consumo (ver Figura 3) testados pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Esses testes seguiram os procedimentos, as considerações e as especificações definidas pela *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA) (WISEWOOD, 2008). Em 2006, a AREMA publicou a especificação para o desenvolvimento, manufatura e uso de dormentes feitos a partir da madeira natural ou de uma matriz polimérica (geralmente utilizando PEAD como componente primário) reforçada com fibra, na maioria das vezes de vidro. Essa norma é denominada de *Part 5: Engineered Composite Ties*. A especificação também aborda o tipo de material, dimensões e propriedades físicas e força estrutural dos dormentes (ASSAD, 2007).

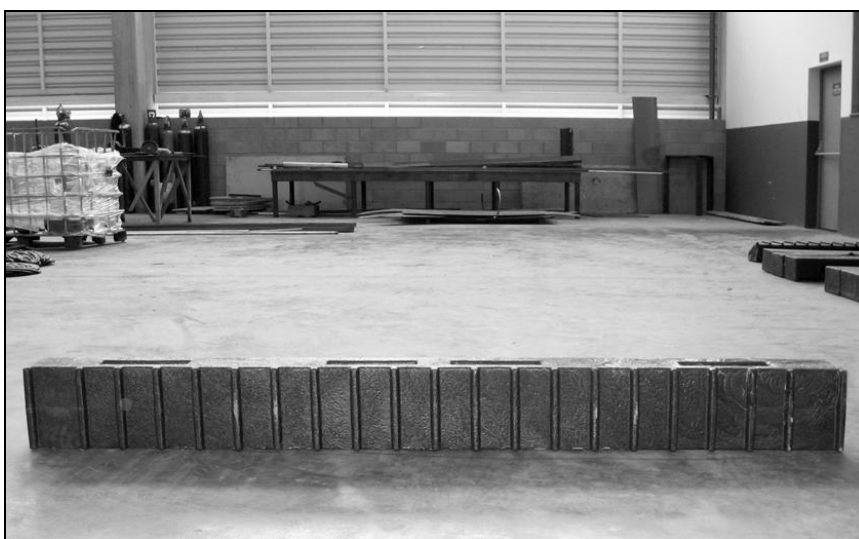


Figura 3 – Dormente de madeira plástica da Wisewood

Foto: Ana Claudia Nioac de Salles, empresa Wisewood, Itatiba, Brasil, 2008.

Com a aprovação em laboratório dos seus dormentes de madeira plástica, a recicladora Wisewood forneceu 400 dormentes para MRS Logística para serem instalados nos trechos de Mendes e de Barra do Pirai no Rio de Janeiro. Para o teste na ferrovia, alguns dormentes de madeira plástica foram instalados intercalados com os de madeira natural (como pode ser visto na Figura 4) e outros em sequência, tanto em curvas como em retas. A tecnologia desenvolvida para produzir dormentes sintéticos a partir de PEAD, fibra de vidro e outros aditivos, é fruto da parceria com o

Instituto de Macromolécula Professora Eloisa Mano (IMA), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Os dormentes são produzidos através do processo de intrusão e sua formulação desenvolvida garante as mesmas propriedades mecânicas e de alongamento da madeira nobre (como a madeira nativa da Floresta Amazônica) (WISEWOOD, 2008).



Figura 4 – Dormente de madeira plástica da Wisewood instalado na ferrovia da MRS Logística

Fonte: Foto fornecida pela empresa Wisewood.

Na Tabela 1 são apresentados alguns dos produtores de dormentes de plástico no mundo.

Tabela 1 – Produtores de dormentes de plástico no mundo

Nome e página na internet da empresa	Localização	Vida útil	Composição da matéria-prima e marca registrada
ABV www.abv1991.ru	Moscou – Rússia	(n.d)	Polímero e concreto.
Axion International www.axionintl.com	Basking Ridge, New Jersey - EUA	Pelo menos 50 anos	PS, PEAD, acrílico, policarbonato e fibra de vidro. 100% reciclados.
Cogumelo - Policog www.cogumelo.com.br	Rio de Janeiro, RJ – Brasil	(n.d)	PEAD e fibra de vidro.
Dynamic Composites www.dynamic-cci.com/product.htm	Columbia, Indiana - USA	(n.d)	Mistura de concreto e de aço e revestido com uma “capa” de plástico e borracha de pneu de pós-consumo. Usa a tecnologia desenvolvida pela Primix Corporation.

Continuação da Tabela 1

Nome e página na internet da empresa	Localização	Vida útil	Composição da matéria-prima e marca registrada
Ecology Plastic www.ecologyplastic.com.br	Campinas, São Paulo – Brasil	(n.d)	PEAD e fibra de vidro.
EPS Plastic Lumber www.epsplasticlumber.com	Elgin, Illinois – USA	50 anos de garantia	100% de plástico reciclado.
Fraunhofer ICT, NGR Recycling Machines e PAV Recyclate (Fonte: FRAUNHOFER, 2008)	Pfinztal, Alemanha	Pelo menos 50 anos	Resíduos plásticos pós-consumo, fibra de vidro e agentes auxiliares. Ainda em desenvolvimento do produto.
IntegriCo Composites www.integrico.com	Temple, Texas - EUA	Pelo menos 30 anos	Uma viga de madeira (carvalho) retangular coberta por uma mistura de resíduo de polietileno com carbonato de cálcio e talco mineral.
International Track Systems (ITS) www.itsrailroadrubber.com	New Castle, Pensilvânia – EUA	50 anos	Mistura PEAD virgem ou reciclado com PS, PU, borracha e outros aditivos.
Lankhorst Mouldings www.lankhorst-mouldings.nl	Holanda	(n.d)	Pelo menos 40 anos. Aço reforçado com plástico 100% reciclado. Marca KLP®.
PolySum Technologies, LLC www.polysum.com	Fort Worth, Texas - EUA	(n.d)	Marcas Tuff-Tie® e Hi-Load®.
Polywood, Inc. www.polywood.com	Edison, Nova Jersey - EUA	(n.d)	Plástico reciclado de pós-consumo e pós-industrial. Mistura PEAD (65%) e PS (35%).
Precon www.precon.com.br	Pedro Leopoldo, MG - Brasil	(n.d)	Ainda em desenvolvimento do produto.
Primix Corporation www.railway-technology.com/contractors/rail/primix2/	New Paris, Indiana - EUA	(n.d)	Mistura de concreto e de aço e revestido com uma “capa” de plástico e borracha de pneu de pós-consumo. Plástico, borracha e aço reciclados.
Performance Rail Tie (PRT) www.plasticities.com e ForcePro www.forcepro.net	Paris, Texas - EUA	Mais de 40 anos	Resíduo de PEBD misturado com nylon ou outro PE. Uma barra de ferro é colocada na parte superior e outra na parte inferior para reforçar a estrutura. Marcas CavityTie™ e PowerFeed™.
RDSO project: Permal Wallace e Allen Reinforced Plastics (Fonte: CHATTREE <i>et al.</i> , 2007)	Bhopal e Hyderabad - Índia	40 e 50 anos	Resina de poliéster, retardador de fogo, acelerador, endurecedor e estabilizador de radiação ultravioleta.
Recycle Technologies International (RTI) www.rti-railroad-tie.com	Labelle, Florida – EUA	Mais de 50 anos.	Plástico reciclado, oriundo principalmente da atividade agrícola, e fibra mineral. Proteção contra radiação ultravioleta. Marca PermaTie™.
Reluma e Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (Fonte: SCHEIBE, 2008)	Großröckerswalde - Alemanha	(n.d)	PEAD (35%) e PP (65%), reciclados. Marca Relumat 2000®.

Continuação da Tabela 1			
Nome e página na internet da empresa	Localização	Vida útil	Composição da matéria-prima e marca registrada
Sekisui - Sumika Bayer Urethane www.compositesworld.com/products/polyurethane-lumber.aspx e www.jeccomposites.com/composites-news/1108/On-the-right.html	Kukuchi, Amagasaki, Hyogo - Japão	Pelo menos 50 anos	Espuma de poliuretano reforçada com longas fibras de vidro (materiais virgens). Marca Eslon Neo Lumber FFU.
Tietek Composite Crossties www.tietek.com	Houston (até 2003) e Marshall, Texas - EUA (desde 2004)	Mais de 40 anos	85% de material reciclado. Mistura de PEAD de garrafas e sacolas plásticas (55%) com borracha de pneu de carro (12,5%), reforçada com fibra de vidro (12,5%) e combinada com várias fibras minerais (cálcio, carbonato, mica etc.) (20%). Marca TieTek™.
Tufflex Plastics (PTY) www.tufflex.co.za	Germiston – África do Sul	(n.d)	Mistura de plásticos reciclados: PP, PEAD e PEBD.
U.S. Plastic Lumber (USPL) (Fonte: CIC, 2003)	Boca Raton, Florida - EUA	Pelo menos 50 anos	PEAD e fibra de vidro. Maior fabricante norte-americano de produtos feitos de PEAD reciclado. Marca DuraTie.
voestalpine (VAE) (Fonte: BAYER, 2008)	Viena, Áustria	Pelo menos 50 anos	Espuma de poliuretano reforçada com longas fibras de vidro (materiais virgens). Marca Eslon Neo Lumber FFU.
Wisewood www.wisewood.com.br	Itatiba, São Paulo - Brasil	50 anos	PEAD pós-consumo, fibra de vidro e cargas adicionais.

Fonte: Elaboração própria com base nas fontes e nas páginas de internet citadas.
(n.d.) – dado não disponível

3.3 Mercado do Dormente de Ferrovia

A construção de ferrovias demanda grandes quantidades de dormentes e a madeira natural é uma das opções mais utilizadas nacional e internacionalmente. Isto porque a madeira natural tem as vantagens de ser de fácil transporte, manuseio e instalação, além de possuir grande resistência ao impacto do trem (FIB, 2006).

3.3.1 No Brasil

O dormente é classificado pela norma brasileira ABNT NBR 7511 (2005) como um artefato a ser aplicado em vias férreas. Eles servem de apoio aos trilhos e para amortecer parte das vibrações produzidas pela passagem de composições, para distribuir ao lastro dos esforços produzidos pelos trens e para dar suporte aos trilhos.

Como ilustrado na Figura 5, o lastro, que serve para manter a estabilidade da via férrea e que preenche o espaço entre os dormentes, pode ser feito com diversos materiais, como terra, areia, cascalho, escórias (subproduto da fundição do minério) e pedra britada de rocha dura (quartzito, basalto, granito, entre outros). O melhor tipo de lastro é a pedra britada que possui maior resistência, não produz poeira e é inalterável aos agentes atmosféricos. O sublastro, que pode ser feito a partir da mistura de dois tipos de solo ou de um tipo de solo com areia e com material mais barato que o lastro, tem como função evitar a penetração do lastro no subleito; aumentar a capacidade de suporte da via; contribuir para uma boa drenagem da água; e permitir que a via não seja rígida para melhor absorver o impacto da passagem dos trens. As placas de apoio, feitas de chapa de aço, são aparafusadas para fixar o trilho aos dormentes (BRINA, 1983). O subleito ou a plataforma da linha dá suporte ao sublastro, ao lastro, ao dormente e ao trilho. A ancoragem do trilho é feita pelos retensores, que são peças metálicas ajustadas à base do trilho e apoiadas na face lateral do dormente (ANTF, 2009). Na Figura 5 são apresentados alguns dos principais elementos da via permanente (ou estrada de ferro) que compõem o leito da ferrovia como o dormente, o trilho e o lastro.

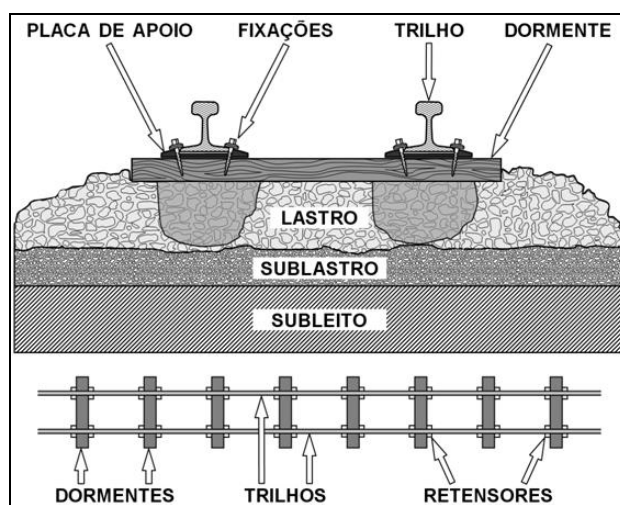


Figura 5 – Elementos da via permanente

Fonte: Elaborado por José Apparicio Pacheco.

Desde o início da construção das ferrovias, do final do século XIX até o final do século XX, utilizava-se a madeira de árvores nativas praticamente sem nenhum controle ambiental. Mas, com o aumento das exigências dos órgãos ambientais e da preocupação com o meio ambiente aparecerem algumas alternativas, como a fabricação de dormentes de áreas de reflorestamento, principalmente de eucalipto. No entanto, essa madeira apresenta propriedade mecânica inferior à da madeira nativa, o que estimulou a busca por soluções que elevassem a vida útil desses dormentes feitos

com madeiras mais moles (BALLARIN *et al.*, 2006). Desse modo, utilizam-se grandes quantidades de produtos químicos nos dormentes de madeira natural, como pesticidas, para impedir a proliferação de microorganismos e insetos. Essa substância química usada nos dormentes de madeira é tóxica e influencia negativamente os indicadores ambientais de toxicidade humana⁴ e a formação de ozônio fotoquímico⁵ (KOHLENER & KÜNNIGER). Maiores detalhes sobre as categorias de impacto ambiental podem ser encontrados no item 4.2.7.

No Brasil, a fabricação de dormentes de madeira utiliza geralmente madeiras de lei, mais nobres e resistentes (como Aroeira, Faveiro, Jacarandá, Ipê, Angico e Maçaranduba) ou madeiras tratadas e mais moles (Eucalipto e Pinho). O maior fator de degradação dos dormentes é o seu desgaste mecânico e não o seu apodrecimento, por isso a madeira nobre tem preferência sobre a madeira mais mole para fabricação de dormentes de vias férreas com elevada densidade de tráfego (FARIA, 2006).

Atualmente, a maior parte da malha ferroviária brasileira, em torno de 32 mil quilômetros de extensão, está assentada sobre cerca de 60 milhões de dormentes, sendo 90% deles feitos com madeira nativa, como pode ser observada pelos dados apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente sobre transporte de carga e de passageiros. A substituição anual de dormentes no Brasil situa-se em torno de 4,0 milhões de unidades, ou seja, 7,4% dos dormentes são renovados a cada ano (ASSAD, 2007).

Tabela 2 - Ferrovias de carga no Brasil

	Nome da ferrovia	Empresa responsável	Estado	Malha (km)	Unidades e tipo de material dos dormentes instalados*
1	ALL - América Latina Logística (antiga Ferrovia Sul Atlântico)	América Latina Logística	Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul	7.225 (ou 20.495 incluindo internacional)	13.380.700 – maioria de madeira natural
2	Transnordestina Logística (antiga CFN - Companhia Ferroviária do Nordeste)	CSN	Alagoas, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí e Rio Grande do Norte	4.238 - conectada a EFC, FCA e portos	7.848.776 – maioria de madeira natural

⁴ Toxicidade humana: efeitos na saúde humana como aumento da incidência de asma e de dificuldade respiratória (MCDOUGALL *et al.*, 2001).

⁵ Formação de ozônio por reação fotoquímica: a emissão dos compostos voláteis orgânicos (VOC). Poluição atmosférica que ocorre em função, basicamente, das emissões dos automóveis e dos processos de combustão industriais (LEMONS & BARROS, 2006).

Continuação da Tabela 2					
	Nome da ferrovia	Empresa responsável	Estado	Malha (km)	Unidades e tipo de material dos dormentes instalados*
3	EFC - Estrada de Ferro Carajás	Vale	Pará e Maranhão	892	1.486.964 – maioria de aço.
4	EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas	Vale	Minas Gerais e Espírito Santo	905 km e transporta 37% de toda a carga nacional.	1.508.635 – mais de 50% de aço.
5	FTC - Ferrovia Tereza Cristina S.A.	Interfinance partners e Santa Lúcia Agroindústria e Comércio	Santa Catarina	164	303.728 – maioria de madeira natural
6	FCA - Ferrovia Centro Atlântica S.A.	Vale	Goiás, Bahia, Sergipe, Minas Gerais, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo e Distrito Federal	8.093 - conectada a EFVM, MRS, CFN e portos	14.988.236 – maioria de madeira natural
7	Ferrobán - Ferrovias Bandeirantes S.A. (antiga Fepasa)	América Latina Logística	São Paulo	4.186 - conectada a Novoeste e Ferronorte	7.752.472 – (n.d.)
8	Ferropar / Ferroeste – Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.	Governo Paraná e América Latina Logística	Paraná	248	459.296 – maioria de madeira natural
9	Ferronorte - Ferrovias Norte Brasil S/A	América Latina Logística	Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e São Paulo	512	948.224 – maioria de monobloco de concreto
10	MRS Logística	Controlada pela MBR (da Vale), Usiminas, Gerdau e CSN	Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo	2.481	4.594.812 - 90% de madeira natural
11	Ferrovia Novoeste (incorporada à Ferropasa e Ferronorte)	América Latina Logística	Mato Grosso do Sul e São Paulo	1.942 - conectada a Ferrobán	3.596.584 – maioria de madeira natural
12	FNS - Ferrovia Norte Sul	Valec – Engenharia, Construção e Ferrovias, vinculada ao Ministério dos Transportes e Vale	Maranhão e Tocantins	226 - conectada a EFC	376.742 – maioria de monobloco de concreto

Continuação da Tabela 2					
	Nome da ferrovia	Empresa responsável	Estado	Malha (km)	Unidades e tipo de material dos dormentes instalados*
13	EFJ - Estrada de Ferro do Jarí	Governo federal	Pará	70	129.640 - (n.d.)
14	EFT - Estrada de Ferro Trombetas	Empresa Mineração Rio do Norte S.A	Pará	35	64.820 - (n.d.)
15	EFA - Estrada de Ferro Amapá	MMX Logística do Amapá	Amapá	194	359.288 - (n.d.)
Total de km e unidades de dormentes nas ferrovias de carga				31.411	57.798.917

Elaboração própria com base na Fonte: ANPF, 2008; ANTF, 2009; MT, 2007; SANFER, 2007; SETTI, 2008. *Valores aproximados diante à dificuldade de obtenção dos dados; (n.d.) – dado não disponível

Tabela 3 - Ferrovias de passageiros no Brasil

	Nome da ferrovia	Empresa e Estado/Região	Malha (km)	Unidades e tipo de material dos dormentes instalados*
1	Companhia Brasileira de Trens Urbanos – CBTU	RJ, SP, RS, BH, PE, PB, BA, CE, AL, RN, DF e PI (capitais)	206	343.402 - (n.d.)
2	Ramais: Guapimirim e Niterói	Cia Estadual de Engenharia de Transportes e Logística, CENTRAL - RJ	92	153.364 - (n.d.)
3	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos	CPTM - SP	253	421.751 - (n.d.)
4	Empresa de Trens Urbanos de Porto Alegre	TRENSURB - RS	34	56.678 – maioria de concreto
5	Estrada de Ferro Campos do Jordão	EFCJ - Pindamonhangaba e Campos do Jordão (SP)	47	78.349 – maioria de madeira natural
6	Estrada de Ferro da Mineração Rio do Norte	EFMRN	35	58.345 - (n.d.)
7	Ramais: Deodoro, Japeri, Santa Cruz, Leopoldina (Saracuruna), Belford Roxo e Vila Inhomirim	Supervia - RJ	225	375.075 – maioria de madeira e concreto
Total de km e unidades de dormentes nas ferrovias de passageiros			682,3	1.486.964

Elaboração própria com base na Fonte: ANPF, 2008; ANTF, 2009; MT, 2007; SANFER, 2007. *Valores aproximados diante à dificuldade de obtenção dos dados; (n.d.) – dado não disponível

SETTI (2008) conta em seu livro “A história de um século e meio das ferrovias brasileiras” desde a construção da primeira via férrea, a Estrada de Ferro Mauá (ou Estrada de Ferro de Petrópolis) em 1854 até os dias atuais. Dentre os assuntos abordados apresenta a questão das bitolas⁶ utilizadas em cada uma delas. Na construção da primeira estrada de ferro foi utilizada a bitola de 1,676 m e nas demais ferrovias pioneiras a bitola de 1,60 m, como nas linhas da antiga Malha Sudeste formada pela Estrada de Ferro Central do Brasil (inaugurada em 1858) e pela Estrada de Ferro Santos a Jundiaí (inaugurada em 1860), hoje operadas e controladas pela empresa MRS Logística. Após 1871, com a inauguração da Estrada de Ferro União Valenciana no Rio de Janeiro com bitola de 1,10 m, sob o argumento de que as bitolas estreitas oferecem uma construção geométrica da ferrovia mais simples e econômica, tornou-se crescente a instalação de bitolas estreitas, como as métricas. Existe muita divergência e discussão em torno da escolha da bitola que, atualmente, pode variar de 1,0 m (bitola métrica); 1,435 m (bitola normal) a 1,60 m (bitola larga ou bitola irlandesa). A Figura 6 retirada desse livro mostra a malha ferroviária brasileira.



Figura 6 – Ferrovias no Brasil - 2008

Fonte: SETTI, 2008.

⁶ Segundo a Associação Nacional dos Transportes Ferroviários, bitola é a distância entre as faces internas dos boletos (parte superior do trilho, sobre a qual deslizam as rodas dos veículos) dos trilhos, tomada na linha normal a essas faces, 16 mm abaixo do plano constituído pela superfície superior do boleto do trilho (ANTF, 2009).

O dormente de madeira natural (serrada) deve ter as dimensões (máximas) apresentadas na Tabela 4 de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7511 (2005).

Tabela 4 – Dimensões do dormente de madeira natural (serrada)

Bitola (m)	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)
Métrica (1,0 m)	22-24	16-17	200-230
Normal (1,435 m)	24	17	265
Larga (1,6 m)	24	17	280

Fonte: ABNT, 2005.

Na Tabela 5 são apresentados os anos de serviço e os preços dos quatro tipos de dormentes aplicados no sistema ferroviário brasileiro. Para melhor visualização da tabela, a madeira natural foi chamada apenas de “madeira” e a madeira plástica de “plástico”. O preço anual foi calculado dividindo o preço do dormente pelos anos de sua vida útil.

Tabela 5 – Vida útil e preço dos dormentes no Brasil

Item avaliado	Madeira ^a	Plástico ^b	Concreto ^c	Aço ^d
Vida útil (anos) – (1)	15-20	40-50	40-50	40
Preço (US\$) – (2)	40-100	85-200	200-250	160-200
Preço anual (US\$) - (2)/(1)	3,0-5,0	2,1-4,0	4,0-5,0	4,0-5,0

Elaboração própria com base nas fontes: ^a ALBERONI & ARRUDA, 2008; ASSAD, 2007; BASTOS, 1999; BONENTE *et al.*, 2006; MRS, 2008; PORTO, 2004; RODRIGUES *et al.*, 2008; SUPERVIA, 2008; ^b ASSAD, 2007; CM, 2008; RODRIGUES *et al.*, 2008; WISEWOOD, 2008; ^c ALBERONI & ARRUDA, 2008; BASTOS, 1999; BONENTE *et al.*, 2006; CONPREM, 2008; DORBRAS, 2008; MRS, 2008; PORTO, 2004; RODRIGUES *et al.*, 2008; ^d ALBERONI & ARRUDA, 2008; BONENTE *et al.*, 2006; RODRIGUES *et al.*, 2008; PORTO, 2004.

O peso e o preço dos dormentes variam de acordo com as suas dimensões (como apresentado na Tabela 4) e com a qualidade e o tipo do material (como a diversidade da madeira) que é utilizado para sua fabricação. A atual dificuldade de fiscalização e controle quanto à origem da madeira natural cortada na Floresta Amazônica, que é fornecida em grande parte por pequenas serrarias, permite que o mercado clandestino ainda seja rentável. Apenas para citar um exemplo, segundo uma dissertação de mestrado publicada em 2006 do Instituto Militar de Engenharia, o dormente de madeira de lei proveniente da Floresta Amazônica e produzido ilegalmente chega a custar, na região sudeste, em torno de US\$ 15-20 (FARIA, 2006). Já empresas que trabalham com madeira de origem controlada, como a Sanfer Comercial Ltda., vendem

seus dormentes por US\$ 40 ou até mesmo por US\$ 100 (dependendo do tipo da madeira e do gasto com o transporte - Tabela 5), dificultando ainda mais o uso de outras matérias-primas substitutas para os dormentes ferroviários. De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, o preço médio da madeira nativa serrada bruta em dezembro de 2006 era de R\$1261,46 / m³ (IPT, 2006). Ou seja, para a fabricação de cada dormente com dimensão de 0,1142 m³, a madeira serrada vendida legalmente nas serrarias custava R\$ 144.

As principais características, vantagens e desvantagens dos dormentes de ferrovia feitos de madeira natural, madeira plástica, concreto e aço estão listadas na Tabela 6. Essas características são para todos os dormentes fabricados e instalados no mundo.

Tabela 6 – Características dos dormentes de ferrovia

Característica	Madeira ^a	Plástico ^b	Concreto ^c	Aço ^d
Peso (kg)	69-110	70-120	300-400	70
Número de dormentes/km	1.852	1.852	1.667	1.667
Se material reciclável?	Sim (sem pesticida)	Sim	Sim	Sim
Há risco de incêndio?	Sim	Sim	Não	Não
Pode ser atacado por microorganismos?	Sim	Não	Não	Não
Há perda no descarrilamento?	Não	Não	Sim	Sim
Apresenta tráfego ruidoso?	Não	Não	Não	Sim
Há necessidade de tratamento químico?	Nobre – Não Mole - Sim	Não	Não	Sim
É condutor de eletricidade (interferência no circuito de sinalização)?	Não	Não	Não	Sim
Lastro necessário	30 cm de lastro. No Brasil o custo do lastro é de R\$40/m ³ .	30 cm de lastro. No Brasil o custo do lastro é de R\$40/m ³ .	Precisa de 40 cm de lastro e troca com maior frequência.	(n.d)

Continuação da Tabela 6				
Característica	Madeira ^a	Plástico ^b	Concreto ^c	Aço ^d
Sistema de fixação e manutenção	Simplex	Simplex.	Mecanizada; mais custosa; seu maior peso dificulta o manuseio.	Similar ao dos dormentes de madeira; propenso a ferrugem e exige freqüente substituição e reforço dos fechos.
Resistência e estabilidade	Boa resistência lateral; funciona bem em curvas; suporta grande tensão, resistente a elevadas cargas por eixo; oferece maior estabilidade à linha, não racha, não trinca, preserva o material rodante e a geometria da via.	Similar ou superior à madeira; suporta grande tensão, resistente a elevadas cargas por eixo; oferece maior estabilidade à linha, não racha, não trinca, preserva o material rodante e a geometria da via.	Excessiva rigidez e menor resistência aos impactos podendo trincar; transfere toda a força recebida para o lastro; seu maior peso oferece maior resistência para a via.	Sua maior rigidez dificulta a fixação do trilho; via menos estável devido ao seu menor peso; e bom para curva com alta resistência lateral.
Desempenho	Bom para vias que transportam carga pesada; com traçado sinuoso (como em lugares montanhosos); e próximas a centros urbanos.	Bom para locais com grandes variações climáticas e próximos ao mar; impermeável à água e aos efeitos biológicos.	Bom para vias com grande fluxo de passageiros e com geometria mais uniforme, resultando em rolamento mais suave, seguro e maior conforto para os passageiros.	Indicados para túneis onde a substituição é menos freqüente; não é bom para ambientes próximos ao mar (devido à degradação por oxidação); inadequado para vias que operam acima de 100 km/h, pois não têm amortecimento e todo o esforço é transmitido ao lastro.

Continuação da Tabela 6				
Característica	Madeira ^a	Plástico ^b	Concreto ^c	Aço ^d
Atuais dificuldades do mercado	No Brasil, redução da oferta e queda na qualidade; incerteza na continuidade do fornecimento. Na Alemanha, perda de mercado para os dormentes de concreto (devido ao menor preço).	Garantia da qualidade e da frequência do fornecimento da matéria-prima; em fase de P&D.	No Brasil, maior preço do que os outros materiais.	Gasto adicional com isolamento elétrico; requer alta qualidade do material.

Elaboração própria com base nas fontes: ^a ABNT, 2005; ALBERONI & ARRUDA, 2008; ASSAD, 2007; BASTOS, 1999; BONENTE *et al.*, 2006; FRAUNHOFER, 2008; MRS, 2008; PORTO, 2004; RODRIGUES *et al.*, 2008; SUPERVIA, 2008; ^b ASSAD, 2007; CM, 2008; FRAUNHOFER, 2008; MCCONNELL, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2008; TIETEK, 2008; WISEWOOD, 2008; ^c ALBERONI & ARRUDA, 2008; BASTOS, 1999; BONENTE *et al.*, 2006; BRINA, 1983; CONPREM, 2008; DORBRAS, 2008; MRS, 2008; PORTO, 2004; RODRIGUES *et al.*, 2008; ^d ALBERONI & ARRUDA, 2008; BONENTE *et al.*, 2006; BRINA, 1983; RODRIGUES *et al.*, 2008; PORTO, 2004.

3.3.2 Na Alemanha

O total da malha ferroviária alemã é de aproximadamente 60.000 quilômetros, abrangendo 30% da linha férrea europeia (com cerca de 200.000 km), assentada em 100 milhões de dormentes, sendo 75.000 dormentes de Aparelho de Mudança de Via (FRAUNHOFER, 2008). Dentre os dormentes instalados, 70% são feitos de concreto, 15% de madeira e 15% de aço (FIB, 2006; WÜLKINIZ, 2008). Todos os dormentes feitos de madeira são impregnados com creosoto (mancha preta na madeira como pode ser visto na Figura 7). A vida útil dos dormentes impregnados é de 26-30 anos (KOHLER & KÜNNIGER, 2003) e dos fabricados de concreto e de aço varia entre 30 e 50 anos (FIB, 2006; GLEISBAU, 2008; RAILONE, 2008).

Segundo a empresa alemã *ThyssenKrupp* (2008), a substituição anual dos dormentes é de 11 milhões, sendo 3 milhões de dormentes de madeira e 8 milhões de concreto. Ou seja, 11% dos dormentes são renovados a cada ano. A troca anual dos dormentes de aço é de apenas 100.000 unidades (FIB, 2006).

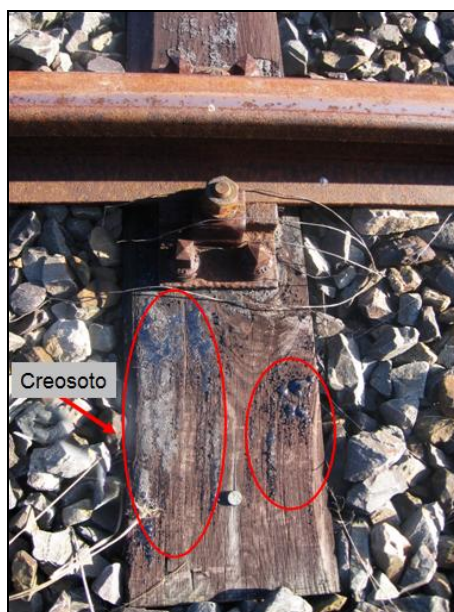


Figura 7 – Dormente de madeira tratada com creosoto

Foto: Ana Claudia Nioac de Salles, empresa Wülknitz -Imprägnierwerk, Wülknitz, Alemanha, 2008.

Na Tabela 7 são apresentados os anos de serviço e os preços dos quatro tipos de dormentes aplicados no sistema ferroviário alemão.

Tabela 7 – Vida útil e preço dos dormentes na Alemanha

Item avaliado	Madeira	Plástico	Concreto	Aço
Vida útil (anos) – (1)	26-30	50	30-50	30-50
Preço (€) – (2)	70	80-155	45	126
Preço anual (€) -(2)/(1)	2,3-2,7	1,6-3,1	0,9-1,5	2,5-4,2

Elaboração própria com base na Fonte: SCHEIBE, 2008.

A empresa ferroviária Deutsche Bahn AG, que pertence ao governo alemão, é a mais importante da Alemanha e da Europa, responsável por quase 40.000 quilômetros (conforme ilustrado na Figura 8). Em 2007, a empresa anunciou um amplo programa de reforma e manutenção de 87% da sua malha ferroviária ao longo de três anos, o “ProNetz”. Para 2008 o programa previa a substituição de 5.500 km de via férrea e 5 milhões de dormentes (DB, 2007). Essas medidas têm como objetivo o cumprimento de revitalização do sistema de transporte da União Européia iniciado em 2001, quando foi lançado o programa *European transport policy for 2010: time to decide*. Nele foram apresentadas medidas para melhorar, reconstruir e revitalizar todo o sistema de transporte europeu até 2010. Um das medidas propostas é a aplicação de técnicas e

produtos inovadores na construção de linhas férreas, como os dormentes feitos a partir de plásticos reciclados (FRAUNHOFER, 2008).



Figura 8 – Ferrovias na Alemanha

Fonte: DB, 2007⁷.

As madeiras mais utilizadas na fabricação dos dormentes alemães são *Fagus* e Carvalho, ambos pertencentes à família *Fagaceae*, provenientes das florestas de reflorestamento da Alemanha (WÜLKNITZ, 2008). A área total da cobertura florestal original da floresta alemã há 8 mil anos atrás (cerca de 33 milhões de hectares) não existe mais, ou seja, foi completamente devastada. Em 2000, a área florestal total registrada na Alemanha foi de 30% (10.740 mil hectares) de todo o território alemão (35.698 mil hectares) (EARTHTRENDS, 2003).

3.4 Mercado dos Resíduos Plásticos

Neste item é apresentada a quantidade consumida e gerada dos resíduos plásticos e como é realizado o gerenciamento desses materiais no Brasil e na Alemanha.

3.4.1 No Brasil

Os plásticos são empregados nos mais diversos setores, sendo os de bens de consumo semi e não-duráveis (utilidades domésticas, têxtil, brinquedos, limpeza doméstica, calçados e acessórios) o principal deles, representando 52% do mercado brasileiro, seguido dos bens duráveis (automobilístico, eletroeletrônicos e móveis) com

⁷ Obs: a diferença de cores não está disponível na fonte (DB, 2007).

19%, conforme apresentado na Tabela 8 (ESMERALDO, 2008). O plástico usado no mundo é produzido a partir da nafta e absorve 4% da extração mundial do petróleo (LUNDQUIST *et al.*, 2000).

Tabela 8 - Utilização do plástico por setor no Brasil

Setor	%
Bens de consumo semi e não-duráveis	52
Bens de consumo duráveis	19
Construção civil	11
Agropecuária	10
Outros	8

Fonte: ESMERALDO, 2008.

A pesquisa Ciclosoft sobre a composição média do lixo da coleta seletiva no Brasil, realizada pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2008) verificou que o plástico representa 22% em massa do total do lixo coletado. Esse percentual fica atrás apenas do papel e do papelão (39%), como pode ser visto na Figura 9.

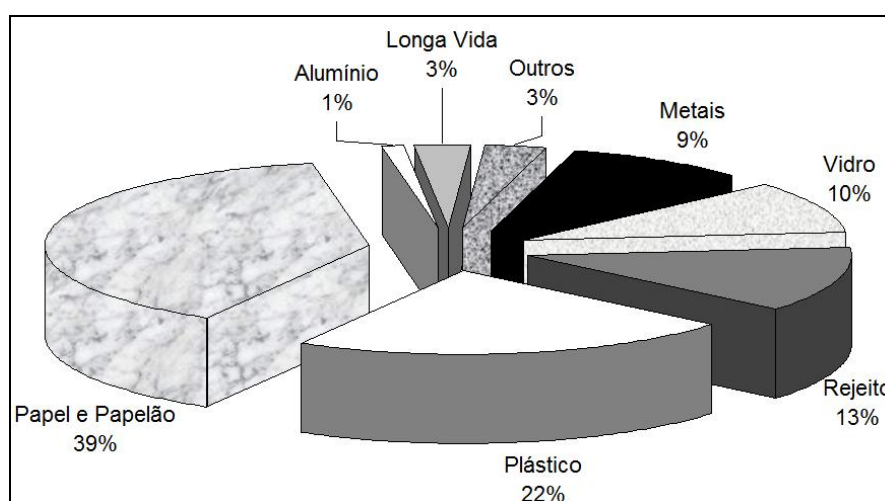


Figura 9 – Composição média do lixo coletado no Brasil (% em massa)

Fonte: CEMPRE, 2008.

Segundo a pesquisa Ciclosoft, apenas 14% dos brasileiros (26 milhões) têm acesso a programas de coleta seletiva e somente 405 municípios - ou 7% do total de 5.564 municípios - operam programas de reciclagem de lixo (CEMPRE, 2008; IBGE, 2006). Apesar de a legislação ambiental brasileira ser uma das mais avançadas no mundo, há falta de fiscalização para garantir o seu cumprimento e o Brasil ainda não dispõe de

legislação específica para os resíduos sólidos urbanos. Até o momento, tramita no Congresso Nacional o Projeto de Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos e também faltam programas de incentivo fiscal do manejo adequado dos RSU. Em 2006 foi publicado o Decreto Nº 5.940/2006, que institui a separação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e entidades da administração pública federal direta e indireta, na fonte geradora, e a sua destinação às associações e cooperativas dos catadores de materiais recicláveis.

SPINACÉ & de PAOLI (2005) constataram que nas grandes cidades brasileiras a maioria dos polímeros descartados como RSU é representada pelos polietilenos de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD, respectivamente), poli(tereftalato de etileno) (PET), poli(cloreto de vinila) (PVC) e polipropileno (PP). Esses polímeros são usados na fabricação de produtos como embalagens de detergentes, sacolas de supermercado, filmes e frascos para uso alimentício, entre outros.

A Plastivida Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos desenvolveu, a partir da MaxiQuim Assessoria de Mercado, um estudo sobre a Indústria de Reciclagem Mecânica dos Plásticos no Brasil (IRmP), com base em dados de 2003 a 2005 (PLASTIVIDA, 2008). A pesquisa verificou que do total da geração de plástico pós-consumo (2,3 milhões de toneladas), 49% são provenientes da região sudeste, onde se concentra a maioria da população urbana do país. Por outro lado, a região Norte, onde a população é menor, contribui com apenas 6%.

Com relação aos tipos de resíduo plástico descartados, a pesquisa IRmP identificou que 34% foram fabricados com polietileno de baixa densidade/polietileno linear de baixa densidade (PEBD/PELBD) – usados para a fabricação de sacolas de supermercado, sacos de lixo, bolsa para soro medicinal, filmes para embalar alimentos, e outros. Observa-se que são produtos de uso único, o que explica porque esses produtos são geralmente descartados pelos consumidores após brevíssimo período de uso.

Em 2005, a reciclagem de plástico pós-consumo no Brasil foi de quase 20% (ver Tabela 9), equivalente a cerca de 455 mil toneladas, e as regiões sul e sudeste, juntas, foram responsáveis por 54% da reciclagem. Os resíduos de PET, na sua maioria sob forma de garrafas de refrigerante, representam mais da metade do total reciclado (53%), enquanto apenas 16% do PEAD foram reciclados.

Tabela 9 - Índice de reciclagem mecânica por tipo de plástico pós-consumo

Tipo de plástico	Quantidade descartada (mil toneladas)	Quantidade reciclada (mil toneladas)	Taxa de reciclagem
PET	455	243	53%
PEAD	335	52	16%
PS	133	17	13%
PEBD/ PELBD	789	76	10%
PP	381	36	9%
PVC	150	8	5%
Outros tipos	56	6	14%
Total	2.299	440	20%

Fonte: PLASTIVIDA, 2008.

No Brasil, diferentemente no que ocorre nos países desenvolvidos, a reciclagem acontece de forma espontânea. O consumo anual *per capita* de plástico na América Latina é de 21 kg, enquanto dos países norte americanos e do oeste europeu está em torno de 100 kg, tendendo para 120 kg em 2010. Atualmente, a média mundial é de 31 kg (PLASTICSEUROPE, 2008).

3.4.2 Na Alemanha

Na Alemanha, a coleta de resíduos sólidos urbanos é tarefa dos municípios (aproximadamente 10.000) e cada um criou o seu próprio sistema de forma a cumprir com a lei de gerenciamento dos resíduos. Os dois métodos básicos de recolhimento dos materiais são a partir da coleta seletiva feita nos estabelecimentos e nas residências e da entrega nos pontos de coleta. Dependendo do tamanho da população, contêineres ou caixas são colocados nas ruas ou em uma área específica designada.

A primeira lei alemã para gestão dos resíduos foi posta em vigor em 1972, a fim de evitar graves riscos ambientais a partir da disposição em aterros ou outras atividades de destinação final. Até 1990, a coleta seletiva funcionou positivamente e nesse momento surgiu a idéia de incorporar à legislação a responsabilidade das indústrias produtoras pelo descarte dos materiais por elas produzidos. A primeira portaria a entrar em vigor foi para embalagem: *Packaging Ordinance* em dezembro de 1991. Esta portaria foi alterada em 1998 e em 1999 integrou toda experiência com o desenvolvimento de tecnologias e sistemas de

reciclagem de embalagens até o momento na Alemanha. Algumas das idéias básicas que estão por trás dessa medida são:

- Princípio do poluidor-pagador: as empresas produtoras de materiais para embalagem são responsáveis pela coleta e disposição final dos mesmos.
- Devolução de determinadas embalagens nos pontos de venda em parceria com o sistema de reembolso dessas embalagens usadas.
- Foi estabelecido um período de transição e adaptação de 4 anos, entre 1991 e 1995. Após esse período metas/quotas foram estabelecidas e fiscalizadas, como a garantia do recolhimento de no mínimo 72% das embalagens para bebidas.

A partir da imposição dessas leis, foi criado o *Dual System Deutschland* (Sistema Dual Alemão - DSD) para recolher e processar os materiais de embalagem separadamente no lugar da gestão dos resíduos sólidos urbanos municipais. Esse sistema integrou a maior parte dos esforços desenvolvidos pelos municípios para coletar materiais recicláveis e, assim, colocá-lo sob uma nova organização.

A organização do DSD licenciou a logo *Der Grüne Punkt* (o Ponto Verde) (ver Figura 10). Os fabricantes de embalagens devem pagar uma taxa de licença (calculado de acordo com o seu peso e tamanho) para poder imprimir o selo nos seus produtos. Apenas as embalagens com esse selo podem ser recolhidas e recicladas pela organização do *Dual System*. Esse sistema não lida com a coleta, a triagem e a reciclagem dos materiais, mas sim da contratação de empresas para realizar essas tarefas, que são pagas com uma “taxa de licença” para garantir o fluxo dos materiais recicláveis. Algumas organizações foram criadas, como a Organização Alemã para Reciclagem de Plástico (em inglês *German Organization for Plastics Recycling*), para organizar a indústria de reciclagem dos materiais já separados. A *German Organization for Plastics Recycling* é responsável por toda a reciclagem do material plástico recolhido que está dentro da sua quota estabelecida pelo *Packaging Ordinance*. Essa medida não só garantiu a coleta e disposição final dos resíduos, mas como estimulou os fabricantes a repensarem nas suas embalagens, reduzindo a quantidade de matéria-prima utilizada para embalar determinados produtos.



Figura 10 – Logo “O Ponto Verde” do *Dual System Deutschland*

Fonte: DSD, 2008

Desde 1991, a quantidade de embalagens de plástico recolhidas e recicladas aumentou drasticamente. No final dos anos 1980 foram coletadas e recicladas apenas 10.000 toneladas e em 1998 o número registrado foi bem maior, 567.000 toneladas (WOIDASKY, 1999).

No entanto, é importante ressaltar que tais critérios só visam otimizar a taxa de reciclagem e não levam em conta o impacto ambiental global das embalagens ao longo de todo o seu ciclo de vida (desde a extração da matéria-prima até a disposição final do produto).

Até 1999, já existiam mais de 350 mil plantas de triagem na Alemanha. O depósito de PS e PE após a separação dos materiais pode ser visto na Figura 11. Diversas tecnologias são empregadas para separar os materiais: (i) uso de peneiras rotativas; (ii) separação por densidade no ar, na água ou em soluções aquosas; (iii) separação magnética; (iv) raios infravermelhos; (v) e até mesmo separação manual.



Figura 11 – Local de depósito de material separado em uma unidade de triagem na Alemanha

Foto: Ana Claudia Nioac de Salles, empresa Jakob Becker, Worms, Alemanha, 2008.

Algumas municipalidades e empresas responsáveis pelo manejo dos resíduos criaram uma alternativa para concorrer com o *Dual System*, o *Landbell-System*.

A *Landbell AG* desenvolveu um sistema de revenda *on-line*, que seja rápido, fácil e rentável, para que as empresas que possuem pequenas quantidades de embalagens descartadas possam cumprir com suas obrigações do *Packaging Ordinance*.

Em 2005, o total de resíduos produzidos na Alemanha foi de 332 milhões de toneladas, sendo 86% gerados pelo setor industrial e 14% pelo pós-consumo. Do total do pós-consumo, 13% foram embalagens. A quantidade de resíduos de plástico recolhidos foi 4,4 milhões de toneladas, sendo 1,2 milhão de toneladas de polietileno (27%) e 0,7 milhão de toneladas de polipropileno (16%). Do total dos resíduos plásticos coletados, 37% foram destinados para reciclagem mecânica, 37% para reciclagem energética, 8% para reciclagem química⁸, 10% para aterros sanitários e 8% foram armazenados. A Figura 12 resume a produção e o consumo de plástico em 2005 na Alemanha (CONSULTIC, 2005).

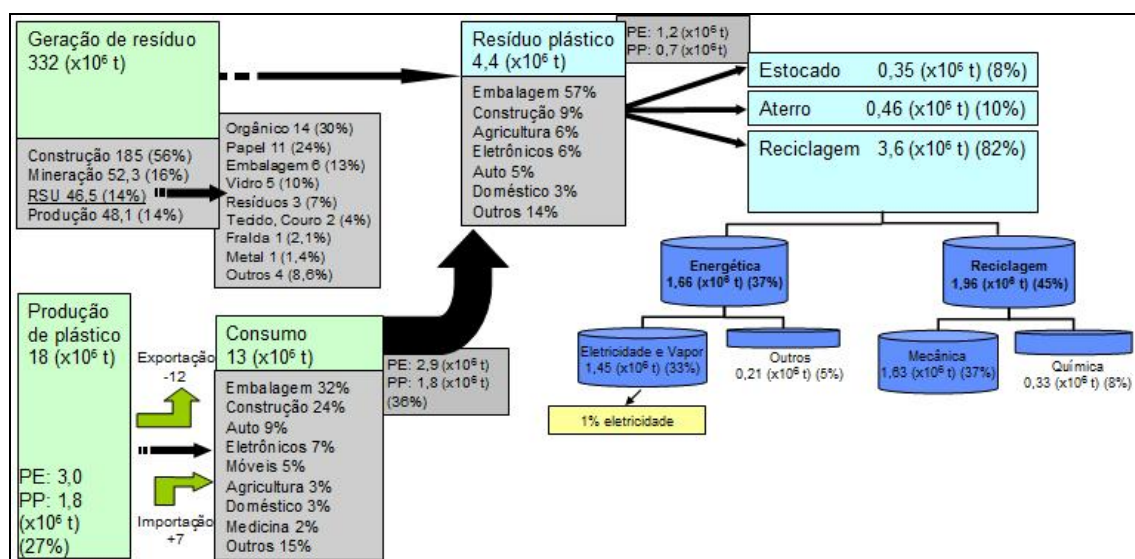


Figura 12 – Produção e consumo dos resíduos plásticos na Alemanha

Elaboração própria com base na Fonte: BMU, 2006; CONSULTIC, 2005.

Do total de resíduos coletados nas residências de 46,5 milhões de toneladas, apenas 9% são representados por embalagens plásticas, como pode ser visto na Figura 13.

⁸ Reciclagem química: transforma os resíduos plásticos em produtos químicos (monômeros ou misturas de hidrocarbonetos), a partir de processos termoquímicos, pirólise (quebra das moléculas pela ação do calor na ausência de oxigênio que gera frações de HC) ou conversão catalítica. Esses produtos químicos podem originar resinas virgens, gases ou óleos combustíveis (GRIPPI, 2006).

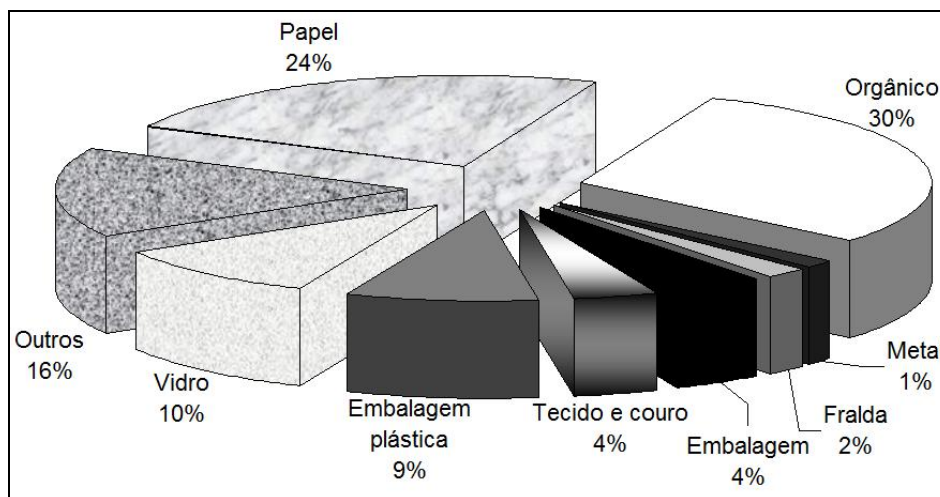


Figura 13 - Composição média do lixo coletado na Alemanha (% em massa)

Fonte: CONSULTIC, 2005.

A informação mais recente encontrada para os resíduos plásticos na Alemanha foi o estudo elaborado pela CONSULTIC (2005) no ano de 2005. A previsão para 2007 era de que a sua geração aumentasse expressivamente com relação aos anos anteriores a 2003 e cada vez mais esses resíduos passassem a ser destinados para a reciclagem energética, como pode ser visto na Figura 14.

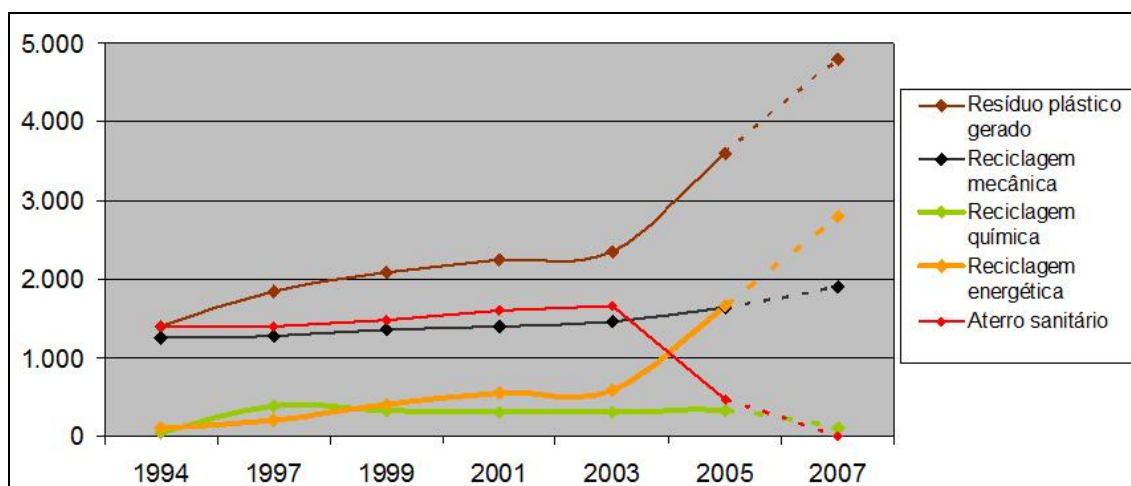


Figura 14 – Geração e disposição final dos resíduos plásticos na Alemanha (em milhões de toneladas)

Fonte: CONSULTIC, 2005.

3.5 Avaliação do Ciclo de Vida

Neste item é apresentada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida abordando sua definição, normas, softwares, banco de dados e estudos desenvolvidos para avaliação dos impactos ambientais de diversos produtos e serviços ao longo de todo o seu ciclo de vida.

3.5.1 Definição

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) constitui uma ferramenta que possibilita avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais desde a aquisição da matéria-prima, passando pela produção e uso, até a disposição final do produto (“do berço ao túmulo” - em inglês, *from cradle to grave*) (ABNT 14040, 2009). Ou seja, é uma análise do balanço de massa e de energia de um determinado produto ou serviço, quantificando os fluxos de entrada e de saída de energia e de materiais ao longo do seu ciclo de vida.

Na definição da Agência Americana de Proteção Ambiental (em inglês *Environmental Protection Agency - EPA*) a Avaliação do Ciclo de Vida é “uma ferramenta para avaliar, de forma holística, um produto ou uma atividade durante todo seu ciclo de vida” (VIGON *et al.*, 1993). Nesse sentido, a ACV proporciona uma visão completa do ciclo de vida do produto ou serviço, que permite uma avaliação do impacto ambiental de cada etapa do processo e, assim, identifica as possíveis alternativas em cada interação, possibilitando a otimização do planejamento do sistema em termos de gestão ambiental ao reduzir o consumo dos recursos naturais e a geração de resíduos (VALT, 2007).

Em suma, a Avaliação do Ciclo de Vida agrega valor ao procedimento de tomada de decisão por conseguir quantificar o fluxo de material e de energia do produto ou serviço, contribuindo, portanto, para a eficiência de cada etapa do processo, promovendo a melhoria da relação produto-meio ambiente (ALMEIDA *et al.*, 2003).

3.5.2 Normas

Em 1990, a organização que reúne diversas instituições internacionais, a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (em inglês *Society of Environmental Toxicology and Chemistry - SETAC*), estabeleceu uma estrutura técnica padrão para os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. Em 1991, a EPA criou um inventário de ACV,

denominado de Avaliação do Ciclo de Vida do Produto: Diretrizes e Princípios (em inglês *Product Life Cycle Assessment: Guidelines & Principles*), cujos autores são *Battelle & Franklin Associates*, e essa metodologia foi padronizada globalmente pela Organização Internacional para Padronização (em inglês *International Organization for Standardization - ISO*) (CIWMB, 2003).

O Brasil participa da ISO por meio da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que é reconhecida pelo governo brasileiro como o Fórum Nacional de Normalização. A ABNT é responsável pela tradução e publicação da versão brasileira das normas ISO 14000: a série de normas NBR ISO 14000. A norma NBR ISO 14040 estabelece os princípios e estruturas para o estudo de Avaliação do Ciclo de Vida e os detalhes adicionais às diversas fases da ACV são fornecidos nas normas complementares descritas a seguir (ABNT 14040, 2009; ABNT 14044, 2009; ISO, 2009):

- ISO 14040 - princípios e estrutura – Estabelece os princípios, requisitos para realização da ACV. Descreve a estrutura, o objetivo e escopo, as fases da análise do inventário, as fases da avaliação do impacto do ciclo de vida, as fases da interpretação do ciclo de vida, a elaboração de relatórios, a análise crítica, as limitações, a relação entre as fases da ACV e a escolha dos valores a serem utilizados. Essa norma não descreve em detalhe as técnicas usadas e nem especifica as metodologias das fases da ACV.
- ISO 14041 - Definição de escopo e Análise do Inventário – Nessa fase devem ser descritos o objetivo, o escopo, o sistema do produto, a fronteira do sistema do produto e o público-alvo do estudo. Além disso, a unidade funcional tem que ser definida para medir o desempenho dos produtos e permitir uma possível comparação entre eles.
- ISO 14042 – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida - Considera todas as entradas (recursos naturais e materiais - *inputs*) e saídas (emissões para a atmosfera, solo e água - *outputs*) em todo o ciclo de vida. Os *outputs* devem ser agregados e associados a um indicador ambiental, classificando-o em categorias para facilitar a identificação dos principais problemas.
- ISO 14043 – Interpretação do Ciclo de Vida – É feita a identificação, a análise, a classificação dos resultados da Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida e o

balanço dos principais impactos ambientais, possibilitando a realização da análise de sensibilidade e da conclusão.

- ISO 14044 - Requisitos e diretrizes da ACV – Envolve os estudos de Avaliação do Ciclo de Vida e os Inventários do Ciclo de Vida.

A série de normas NBR ISO 14000 contém relatórios técnicos que também envolvem a ACV, como por exemplo, a ISO TR 14049:2000, que apresenta exemplos de aplicação da norma ISO 14041 para definição do objetivo e escopo e análise do inventário. O relatório técnico ISO TR 14025:2000 “Declaração ambiental Tipo III – Princípios e procedimentos” - trata dos dados ambientais dos produtos com base no Inventário do Ciclo de Vida. A ISO/IEC TR 15504-6:2008 descreve um modelo de avaliação de processo (em inglês *Process Assessment Model - PAM*) para os processos do ciclo de vida do sistema (ISO, 2009).

A Avaliação do Ciclo de Vida é apenas uma ferramenta para o cumprimento da normalização ambiental da ISO, da *British Standard* (BS), da *European Eco-Management & Audit Scheme* (EMAS), entre outros, como também para o atendimento das exigências de diversos Rótulos Ambientais, de forma a quantificar o desempenho ambiental de cada produto (CHEHEBE, 2002).

O ideal seria que cada produto viesse rotulado com dados ambientais da sua Avaliação do Ciclo de Vida, de modo que os consumidores pudessem compará-lo a outros similares. Essa prática já é comum nos Estados Unidos, principalmente na Califórnia, e a União Européia tem pressionado para que toda a Comunidade exija a ACV dos produtos e serviços. A idéia é dar ao consumidor a opção de escolher o produto ou serviço que seja sócio-ambientalmente mais sustentável. Existe atualmente uma profusão de selos desse tipo.

De modo a organizar a “febre de rótulos e selos ambientais”, a Organização Internacional para Padronização desenvolveu normas para rotulagem ambiental que no Brasil se produziu no Certificado do Rótulo Ecológico ABNT – Selo Verde - Qualidade Ambiental. Esse certificado atesta se um produto está em conformidade com critérios ambientais de excelência, identificando aqueles com menor impacto ambiental em relação a outros produtos compatíveis no mercado (LEMOS & BARROS, 2006).

O selo governamental mais antigo, o Anjo Azul (em alemão *Der Blaue Engel*), acaba de completar 30 anos. Esse programa de rotulagem ecológica alemão foi criado para promover produtos ecologicamente corretos que pudessem ser comparados com outros da mesma categoria. Mais de 4 mil produtos já foram aprovados pela agência ambiental alemã, incluindo produtos químicos de uso doméstico, pilhas e baterias. Os critérios para a sua aprovação exigem o uso eficiente de combustíveis fósseis, produtos alternativos com menor impacto climático, redução de emissão de gases de efeito estufa e conservação dos recursos naturais (Der Blaue Engel, 2008).

O selo ambiental da União Européia, *Ecolabel*, avalia os aspectos ambientais de cada produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Apesar de ser um selo voluntário para os produtos europeus, vem sendo exigido para os produtos importados. Alguns dos produtos avaliados são os de limpeza, os eletrodomésticos, o papel, os lubrificantes e as roupas (LEMOS & BARROS, 2006).

É importante destacar a responsabilidade dos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. Seus resultados podem influenciar de maneira significativa nas negociações internacionais de um determinado produto, incentivando ou dificultando a sua entrada no mercado internacional.

3.5.3 Software e Base de dados

Existe uma série de softwares e base de dados, desenvolvidos por centros de pesquisas, universidades e empresas do mundo todo, que realizam a Avaliação do Ciclo de Vida dos mais variados produtos e serviços.

Em 1990, o software SimaPro começou a ser desenvolvido pela empresa holandesa *PRé Consultants*. Um dos pioneiros em ACV, o SimaPro é uma ferramenta profissional que contém vários métodos de avaliação de inventários de impacto ambiental e diversas bases de dados, que podem ser editados e expandidos sem limitação. O software permite a análise comparativa entre produtos e estudos com ciclos de vida complexos (EPA, 2009).

Em 1989, a Alemanha foi um dos primeiros países a desenvolver um banco de dados de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) disponibilizado gratuitamente ao público com a criação do Modelo de Emissão Global para Sistemas Integrados (em inglês *Global Emission Model for Integrated Systems - GEMIS*) pelo Instituto Ambientalista (em alemão *Öko-Institut*). Em 2002, foi formada a Rede de Inventários do Ciclo de Vida

Alemã (em alemão *Netzwerks Lebenszyklusdaten*) que é uma plataforma de informação e de cooperação científica que envolve todas as instituições interessadas em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (OEKO, 2009).

O software alemão GaBi (em alemão *Ganzheitliche Bilanzierung*) vem sendo desenvolvido desde 1992 pelo departamento de Engenharia de Ciclo de Vida (em inglês *Life Cycle Engineering*), do *Chair of Building Physics* da Universidade de Stuttgart na Alemanha, juntamente com a empresa *PE International*. O GaBi contabiliza os impactos ambientais para a atmosfera, água e solo e oferece a possibilidade de ser feita uma análise comparativa entre balanços de impactos e custos ambientais dos produtos e serviços analisados. Este software, que também oferece uma ampla base de dados na área de energia, transporte, disposição final, entre outros, tem sido utilizado por mais de 150 instituições, incluindo universidades, centros de pesquisa e indústrias (automotiva, química, eletrônica, de reciclagem, de construção, de energia) do mundo todo (GABI, 2009; LBP, 2008).

Outro software alemão é o Umberto, desenvolvido pelos especialistas em ACV do Instituto para Pesquisa de Energia e Ambiental (em inglês *Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg - IFEU*) na Universidade Heidelberg juntamente com a empresa especializada em desenvolvimento de software, Instituto para Computação em Ciências Ambientais (em alemão *Institut für Umweltinformatik - IFU*), em Hamburgo na Alemanha desde 1994. Umberto é um software para modelar, calcular e visualizar estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, sendo um dos principais de ACV na Europa e é utilizado por indústrias, universidades, empresas de consultoria e institutos de pesquisa (mais de 350 licenças já foram vendidas). Assim como o GaBi, também é utilizado por empresas que desejam implementar um sistema de gestão ambiental nas suas unidades (UMBERTO, 2008).

O modelo *Tool for Environmental Analysis and Management* (TEAM), que começou a ser desenvolvido em 1992 pelo grupo francês *Ecobilan Group*, fornece dados da indústria de polímeros e é utilizado por mais de 100 empresas, incluindo BMW, Xerox e General Motors (FRUHBRODT, 2000). Este software é uma ferramenta profissional para avaliação do ciclo de vida ambiental e de custos de produtos e tecnologias (EPA, 2009).

O software americano *Long-range Energy Alternatives Planning System* (LEAP), desenvolvido pelo *Tellus Institute*, foi formulado para ser utilizado no planejamento energético e na mitigação das mudanças climáticas. Pode ser usado para analisar a

energia consumida e produzida por todos os setores da economia, assumindo uma dada população, desenvolvimento da economia, tecnologia, preço, etc. Quando a base de dados *Technology and Environmental Database* (TED) é incorporada ao LEAP, é possível calcular as emissões de diversos gases (CO₂, N₂O, CH₄, NO_x, etc.) nos variados cenários de energia ou analisar cenários de setores não energéticos, como de mudança do uso da terra e de resíduos sólidos. O usuário pode fazer uma análise *top-down* da demanda de energia de um determinado setor, com base nos indicadores macroeconômicos, ou realizar uma previsão *bottom-up* baseado na entrada de dados das tecnologias de cada setor. Esse *software* é usado em 150 países por empresas, universidades e ONGs, sendo os maiores usuários os Estados Unidos, China e Brasil (LEAP, 2006).

O Centro Suíço para Inventários do Ciclo de Vida (em inglês *Swiss Centre for Life Cycle Inventories - ecoinvent Centre*) elabora base de dados, chamadas de ecoinvent que podem ser incorporadas por diversos softwares de ACV, como no EMIS, GaBi, Regis, SimaPro, Umberto, OpenLCA, Green-e, Wrate and Bilan Produit. O ecoinvent contém dados do ciclo de vida de diversos setores industriais (energia, recursos naturais, produtos químicos, metalúrgica, agricultura, gestão de resíduos, transporte e serviços) atendendo mais de 1.200 clientes em mais de 40 países, é uma das bases de dados e plataformas de ACV mais conhecidas internacionalmente (ECOINVENT, 2009).

A Associação de Fabricantes Plásticos na Europa (em inglês *Association of Plastics Manufacturers in Europe - APME*) publica dados anuais sobre o consumo e a reciclagem dos plásticos utilizados como embalagens e nos setores de construção civil, automobilístico e de equipamentos eletro-eletrônicos que podem ser utilizados como *inputs* para estudos de ACV que envolvem esses temas (EPA, 2009).

O Centro de Pesquisa Comum da Comissão Européia (em inglês *European Commission's Joint Research Centre*) apóia o desenvolvimento de diversas abordagens internacionais, indicadores, banco de dados e estudos para estimular e incentivar a aplicação e o uso da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida nas empresas e na administração pública através da Plataforma Européia sobre ACV (em inglês *European Platform on LCA*). A Comissão Européia oferece uma base de dados, chamada de *European Reference Life Cycle Data System* (ELCD), que compreende na Análise de Inventários do Ciclo de Vida de diversos fluxos de materiais e energia no setor de transporte e manejo de resíduos (ELCD, 2009).

Existem diversos outros softwares (como BEES, Green-e, KCL-ECO, OpenLCA, REGIS, PEMS 4, WISARD, WRATE, etc.) e base de dados (como ATHENA, BUWAL, LCI Database, IDEMAT 2005 etc.) que são fornecidos em diversos países. Uma lista de softwares e de base de dados, que inclui todos esses descritos acima e muitos outros, é apresentada com suas respectivas características e utilidades na página da internet da Agência Americana de Proteção Ambiental (EPA, 2009) e no artigo *LCA Software Review – An up-to-date overview of the European market* (FRUHBRODT, 2000).

3.5.4 Pesquisas e Estudos

A partir da década de 1960, diante o crescimento da produção e do consumo das embalagens de uso único (descartáveis) as pressões ambientalistas se intensificaram nos Estados Unidos. Esse movimento desencadeou a elaboração de estudos sobre o consumo de energia e de recursos na produção das embalagens para embasar as decisões a serem tomadas com relação à gestão ambiental. Em 1965, foi então iniciado o estudo precursor, que hoje é conhecido como Avaliação do Ciclo de Vida, financiado pela Coca-Cola e realizado pelo Instituto de Pesquisa do Meio-Oeste (*Midwest Research Institute – MRI*) - localizado na cidade de Kansas nos Estados Unidos - com a idéia de comparar as diferentes matérias-primas para embalagens de refrigerantes. Assim, seria possível identificar os recursos naturais necessários para a fabricação e as emissões para a atmosfera, a água e o solo ao longo de todo o processo produtivo de cada tipo de embalagem selecionada para o estudo. A metodologia desenvolvida para identificar e quantificar os recursos naturais e o impacto ambiental foram denominados de “Análise dos Recursos e Perfis Ambientais” (em inglês *Resources and Environmental Profile Analysis - REPA*). Essa metodologia foi aprimorada em 1974 pelo MRI em outro estudo para Agência Americana de Proteção Ambiental (EPA). Mais tarde, foi desenvolvido um método similar na Europa denominado de Ecobalço (em inglês *Ecobalance*). Diversos estudos e pesquisas foram desenvolvidos nessa linha, incorporando a análise das etapas de gestão dos materiais pós-consumo e as suas possíveis disposições finais. Com esses estudos a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida foi evoluindo, incluindo a interpretação dos resultados e a análise do potencial impacto ambiental do produto ou serviço avaliado (CHEHEBE, 2002; MOURAD *et al.*, 2002).

Desde então, diversas instituições e centros de pesquisas foram criados no mundo com o objetivo de realizar estudos sobre o impacto ambiental dos mais variados

produtos e setores. Como por exemplo, a linha de pesquisa de Avaliação do Ciclo de Vida (em inglês *Life Cycle Assessment – LCA*) da EPA que busca o melhor entendimento dos impactos ambientais dos produtos (EPA, 2009); da Agência Ambiental Européia (em inglês *European Environment Agency - EEA*) que disponibiliza um guia prático para a comunidade industrial e de negócios sobre estudos de ACV (EEA, 2009); do Centro de Pesquisa de Desenvolvimento Global (em inglês *The Global Development Research Centre*) no Japão que dispõe de inventários de ACV (GDRC, 2009); da Organização das Nações Unidas que fornece na sua página na internet (<http://jp1.estis.net/sites/lcinit>) trabalhos sobre padrões sustentáveis de consumo e produção; entre outros que também podem ser encontrados em diversas páginas na internet brasileiras e internacionais. Neles podem ser encontradas a descrição da ferramenta ACV, os estudos elaborados, os softwares e as bases de dados disponíveis, os links de Associações, Instituições e Organizações no mundo inteiro. Dentre os *websites* no Brasil tem-se a comunidade brasileira de ACV (<http://acv.ibict.br>), o Instituto EKOS Brasil (www.ekosbrasil.org) e o Grupo de Pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida da Universidade Federal de Santa Catarina (www.ciclodevida.ufsc.br) (ACV, 2009; EKOS, 2009; UFSC, 2009).

A partir da década de 1990, várias teses, dissertações e projetos têm sido desenvolvidos na linha de pesquisa da Avaliação do Ciclo de Vida tratando dos mais variados temas e setores. A seguir é feito um levantamento de algumas dessas pesquisas e estudos realizados no Brasil e no mundo sobre ACV que abordam pelo menos um dos temas expostos acima: resíduos plásticos; uso da madeira; setor florestal; dormentes de ferrovias; ou um que aborde alguma etapa do ciclo de vida (como o setor elétrico e de transporte).

Na linha de pesquisa de reaproveitamento dos materiais plásticos, podem ser citados quatro estudos que utilizam a ACV. No primeiro, dos coreanos SONG e HYUN (1999), foi utilizado o caso das garrafas PET como exemplo para elaboração de uma metodologia que facilite os estudos de gestão dos resíduos. Foi desenvolvido um modelo matemático que assume a taxa de coleta das garrafas PET e seus encargos como uma função não-linear, utilizando o balanço de materiais e de energia, para ser inserida no modelo e determinar a rota de destinação menos impactante para o meio ambiente e ao mesmo tempo menos custosa. No estudo foi apresentada uma análise de sensibilidade de emissões comparando possíveis cenários de descarte para as garrafas PET, como incineração, aterro sanitário e reciclagem química e mecânica. Foi

concluído que a metodologia desenvolvida pode ser facilmente aplicada em outros estudos ligados à gestão de resíduos.

No segundo trabalho, elaborado por LUNDQUIST *et al.* (2000) foi apresentado o Inventário do Ciclo de Vida das embalagens farmacêuticas (vidro e polipropileno) desenvolvido pela *Pharmacia & Upjohn Packaging Technology R&D* em 1994. No estudo foi concluído que o total de energia consumido e o total das emissões são menores para as sacolas plásticas do que para as garrafas de vidro, sendo o setor de transporte o maior responsável pelo impacto ambiental influenciado pelo maior peso das garrafas de vidro em comparação as embalagens plásticas. Dentre os outros estudos de ACV apresentados em LUNDQUIST *et al.* por diversas instituições, um deles analisa as diferentes destinações do radiador de carro feito de poliamida reforçado com fibra de vidro. Nesse estudo elaborado pela empresa DuPont e pela Associação de Fabricantes Plásticos na Europa foi verificado que no ponto de vista de impacto ambiental a reciclagem mecânica é a melhor alternativa quando comparada à energia consumida nos aterros sanitários e a emissão para atmosfera proveniente da combustão do material descartado.

O terceiro trabalho se refere ao estudo encomendado pela rede de supermercados *Carrefour* à empresa francesa *Ecobilan* (da *PriceWaterHouseCoopers*) para quantificar e comparar os impactos ambientais de quatro tipos de sacolas disponibilizadas em seus caixas para os seus clientes: (i) sacola plástica comum de polietileno (14 litros); (iii) cesto de polietileno reutilizável (35 litros); (iii) sacola de papel (20 litros); e (iv) sacola biodegradável à base de amido de milho (25 litros). Dentre as conclusões do estudo, tem-se que para uma reutilização superior ou igual a 4 vezes, o cesto de PE é mais indicado que a sacola clássica para todos os indicadores de impacto ambiental analisados (ECOBILAN, 2004).

Por fim, no quarto trabalho, de JAMES e GRANT (2005), do instituto de pesquisa australiano *Royal Melbourne Institute of Technology University (RMIT)*, foi feita uma análise comparativa das ACVs de 5 tipos de polímeros degradáveis com outros materiais como PEAD, PEBD, PP, papel pardo e lona para serem utilizados na fabricação das sacolas plásticas de supermercados e lojas. No estudo foi constatado que as sacolas biodegradáveis apresentaram impacto ambiental semelhante, em termos de emissões de gases de efeito estufa e “Eutrofização⁹”, as sacolas convencionais feitas de PEAD. Se as sacolas biodegradáveis forem destinadas para

⁹ Ver item 4.2.7.

compostagem¹⁰ ao invés de aterros sanitários, as emissões de gases de efeito estufa poderiam ser reduzidas, mas não eliminadas, uma vez que a emissão do gás metano tem o poder de aquecimento global maior do que gás dióxido de carbono. Por outro lado, as sacolas sintéticas apresentaram maior impacto na categoria “Depleção abiótica” (redução dos fatores físicos e químicos que ocorrem em um ecossistema que influenciam os seres vivos, como a temperatura e o vento). As sacolas de papel emitem mais gases de efeito estufa devido ao consumo de energia elétrica e gás no seu processo de fabricação.

Em 2001, MCDUGALL *et al.* na sua segunda edição publicaram uma série de estudos de caso apresentado o Inventário do Ciclo de Vida do gerenciamento integrado dos resíduos sólidos em diversos países europeus, nos Estados Unidos e na Índia. Além disso, o livro vem acompanhado do programa IWM-2 que simula cenários de gerenciamento integrado dos resíduos sólidos.

Em 2006, a EPA publicou um estudo de ACV das emissões de GEE provenientes dos resíduos sólidos urbanos depositados nos aterros sanitários ou destinados para as usinas de incineração, compostagem e reciclagem nos Estados Unidos. No estudo foi avaliado que a reciclagem apresenta uma vantagem ambiental, em termos de emissões de GEE e poluição para o ar e para a água, em todas as etapas do ciclo de vida quando comparado produtos feitos com materiais recicláveis aos virgens. Além disso, no trabalho foi apresentado que a reciclagem mecânica de 1 tonelada de latas de alumínio pode conservar mais de 207 milhões de BTUs (British Thermal Unit¹¹), o equivalente a 36 barris de petróleo ou a 1.655 galões de gasolina; e que a reciclagem energética de 82 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos pode reduzir o consumo de mais de 10 bilhões de galões de gasolina (EPA, 2006).

Nessa mesma linha de pesquisa, CHEN & LIN (2007) avaliaram as emissões de gases de efeito estufa proveniente das diversas tecnologias de gerenciamento dos resíduos sólidos (reciclagem, incineração, compostagem, aterro sanitário e alimentação de suínos) elaborando o Inventário do Ciclo de Vida para o caso da cidade de Tapei em Taiwan. No trabalho são apresentadas as reduções das emissões de gases de efeito estufa quando são usados materiais reciclados (plástico, papel, metal, borracha, vidro e alumínio) ao invés de materiais virgens. Contudo, para também reduzir as emissões provenientes do sistema de coleta destacaram que é preciso melhorar a eficiência dos meios de transporte e diminuir o seu consumo de energia.

¹⁰ Compostagem: decomposição da matéria orgânica pela ação de microorganismos.

¹¹ British Thermal Unit = $5,63 \times 10^6$ Barril equivalente de petróleo (bep) (EPE, 2006).

O Instituto Ambiental Finlandês (em inglês *Finnish Environment Institute*) divulgou um estudo com o objetivo de avaliar diversas categorias de impacto ambiental da indústria florestal da Finlândia a partir da aplicação da ferramenta de ACV para identificar as possíveis melhoras que poderiam ser feitas em cada etapa do processo produtivo nos dez anos seguintes. Dentre as 6 etapas analisadas (floresta, produção, energia consumida, produtos químicos, geração de resíduos e transporte), a de produção (que envolve a manufatura dos produtos que utilizam a madeira como matéria-prima), a produção de energia na indústria florestal e o tratamento das emissões e dos resíduos sólidos foram as etapas que apresentaram maior impacto ambiental (SEPPÄLÄ *et al.*, 1998).

Em outro estudo referente ao setor florestal foi desenvolvida uma ACV com o objetivo de analisar a produção de toras de madeira no sudeste americano, produzidas a partir de pinheiros amarelos para serem utilizadas, principalmente, na construção residencial. Somente o processo de secagem das toras consome 85% de toda energia necessária na etapa de manufatura. No entanto, essa energia é produzida a partir da queima dos resíduos de madeira da própria indústria, o que evita, assim, o consumo e a queima de gás natural e reduz o impacto ambiental do processo produtivo dessas toras (MILOTA *et al.*, 2004).

No setor de construção civil que utilizam a madeira foram encontrados dois trabalhos. No primeiro, da universidade da Suécia, é utilizada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida para comparar o balanço de energia e de emissões do dióxido de carbono do uso da madeira e do concreto na construção de edifícios (GUSTAVSSON e SATHRE, 2006). No segundo, do instituto internacional de informação tecnológica indiano, buscam através da ACV, avaliar a melhor alternativa ambiental entre três diferentes tipos de materiais de construção: concreto, aço e madeira. Ao final, apenas sugerem o uso de materiais reciclados, inclusive de madeira plástica (THAREJA *et al.*, ano não disponível).

No Brasil, no final da década de 1990, o Centro de Tecnologia da Embalagem (CETEA) por solicitação da Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens de PET (ABIPET) desenvolveu o projeto “Análise de Ciclo de Vida de Embalagens para o Mercado Brasileiro”. O CETEA deu continuidade a esses trabalhos, elaborando inventários do ciclo de vida de outras áreas como sistema de energia elétrica, transporte e gerenciamento de resíduos sólidos (COLTRO *et al.*, 2003; COLTRO, 2007). Fruto desta parceria entre CETEA e ABIPET, também foi desenvolvido o estudo de ACV das embalagens de PET elaborado por GARCIA e COLTRO (2001), que

verificou o potencial de redução das emissões para o ar, água e solo com a reciclagem da garrafa em substituição ao processo de produção da resina virgem. A partir da construção de 4 cenários, variando a taxa de reciclagem das garrafas, concluiu-se que há uma redução do consumo de água, de petróleo e de gás natural, e das emissões para o ar e para a água. No entanto, notou-se um aumento da emissão de sólidos solúveis para a água proveniente do processo de reciclagem. Na elaboração da ACV, foram utilizados os modelos de geração de energia elétrica, de gerenciamento de RSU, entre outros desenvolvidos pelo próprio CETEA e o software *PIRA Environmental Management System* (PEMS 4) para armazenar e compilar os dados.

A Associação Brasileira do Ciclo de Vida (ABCV) foi criada em 2002 com o objetivo de coordenar a implantação de um programa de capacitação para consolidação da ACV no Brasil. Em 2005, foi apresentada a proposta preliminar do “Projeto Brasileiro de Inventário do Ciclo de Vida para a Competitividade da Indústria Brasileira”, liderado pelo Instituto Brasileiro de Inovação, Ciência e Tecnologia (IBICT), com apoio do Ministério de Ciências e Tecnologias (MCT). O objetivo do projeto é desenvolver uma base de dados nacional para difundir a rotulagem ambiental no país, começando pelo projeto-piloto do Inventário do Ciclo de Vida do óleo diesel que será elaborado pelo IBICT, pela Petrobrás, pela Universidade de Brasília (UnB), pela *PE International* e pela Universidade de *Stuttgart* na Alemanha (IBICT, 2009; PIRES, 2005).

Na Conferência Internacional de Ciclo de Vida (CILCA) realizada na Costa Rica, foi apresentado o panorama de ACV no Brasil (SILVA & KULAY, 2005). No mesmo ano, SILVA *et al.* (2005), da Universidade de São Paulo (USP), apresentaram o Inventário do Ciclo de Vida de energia elétrica no Brasil considerando a sua geração, transmissão e distribuição. A Universidade Federal do Rio de Janeiro também realizou um trabalho de ACV voltado para o setor de transporte (ALMEIDA e FRANCHINI, 2006). Na Universidade Federal do Paraná foi elaborado um estudo de ACV para três tipos de embalagens para bebidas no Brasil, alumínio, PET e vidro (VALT, 2007). Em 2007, foi apresentado o trabalho que compara dois materiais, painel de madeira e painel multilaminar (composto de metal, de madeira e de PVC) para fabricação de caixas de carga de semi-reboque para o transporte de grãos (SARTORI, 2007).

Mais recentemente, GOMES & ARAUJO (2009) apresentaram uma discussão sobre os indicadores ambientais locais e globais para combustíveis fósseis e renováveis. Destacam que dependendo da metodologia abordada para contabilizar as emissões de poluentes locais e as emissões de gases de efeito estufa global ao longo de todo o processo produtivo e do consumo de ambos os combustíveis, os resultados podem

apresentar diferenças significativas na avaliação de impacto ambiental. Nesse estudo é mencionado o Inventário do Ciclo de Vida feito para o biocombustível, elaborado pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (em inglês *National Renewable Energy Laboratory*) nos Estados Unidos. Esse ICV verificou que o biocombustível (feito de soja) emite apenas 20% da emissão total de gás carbônico do ICV feito para o diesel, mas que o consumo de água na irrigação da plantação de soja é muito maior do que o utilizado no processo produtivo do diesel.

Nesse levantamento de estudos de ACV, foram encontrados três que realizaram a Avaliação de Ciclo de Vida de dormentes de ferrovia. O primeiro deles foi elaborado pelo Instituto Federal Suíço para Pesquisa e Testes de Materiais (*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research - EMPA*), que comparou os impactos ambientais dos dormentes de concreto, de aço e de madeira tratada com creosoto (preservante), instalados nas principais linhas ferroviárias da Suíça. No trabalho foram analisadas 7 categorias de impacto ambiental e observado que o tempo de uso dos dormentes na ferrovia influencia esses resultados. O concreto foi o material menos impactante devido a sua longa vida útil. Já o aço apresentou maiores impactos que os dormentes de concreto em praticamente todas as categorias de impacto analisadas, principalmente nas etapas de manufatura da matéria-prima e do dormente. No entanto, a sua capacidade de reciclagem pode contribuir para reduzir os impactos ambientais. Por fim, a madeira impregnada com creosoto foi o material que apresentou maior desvantagem em todas as categorias de impacto ambiental em função basicamente da sua baixa vida útil e da emissão dos componentes do creosoto durante o tempo de uso na ferrovia. Além disso, foi observado que os acessórios requeridos (como o sistema de fixação) para os dormentes de madeira têm um impacto maior que das outras matérias-primas. Na construção de ferrovias que utilizam dormente de madeira são necessárias 3 vezes mais materiais do que nas que utilizam dormente de concreto e 8 vezes mais que os de aço (KÜNNIGER & RICHTER, 1998). Mais detalhes sobre creosoto podem ser encontrados no item 4.2.2.2 do Capítulo 4.

Posteriormente, esse mesmo instituto suíço avaliou-se o ciclo de vida das emissões dos compostos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos¹² (PAHs) a partir da madeira impregnada com creosoto usada como dormente de ferrovia na Suíça. No estudo foi

¹² Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos: são poluentes atmosféricos que apresentam riscos à saúde e ao meio ambiente, poluindo o solo, a água e o ar, a partir de diversas fontes (como o motor a gasolina e a diesel, o alcatrão da fumaça do cigarro, a fumaça da queima da madeira e do carvão). Eles são gerados na produção de derivados do alcatrão da hulha, como o creosoto. Outro exemplo, também pode ser emitido para água no derramamento de óleo de navios-tanque, refinarias e locais de perfuração do petróleo, afetando a fauna aquática (BAIRD, 2002).

verificado que durante o tempo de uso de 20 a 30 anos de cada dormente impregnado 5 kg de creosoto são emitidos. Nesse mesmo período, as emissões dos PAHs ficam na ordem de 0,5 kg e dos compostos fenólicos¹³ são de 10 g para cada dormente. Foi observado que as emissões de PAHs desses dormentes de ferrovia influenciam duas categorias de impacto ambiental: toxicidade humana e formação de ozônio fotoquímica (KOHLEK & KÜNNIGER, 2003).

No final de 2008, WERNER *et al.* publicaram o estudo comparativo da Avaliação do Ciclo de Vida dos dormentes ferroviários de concreto, de aço, de madeira de Carvalho e de Faia tratados com creosoto instalados nas ferrovias alemãs. Nesse trabalho estão envolvidas quatro instituições, dentre elas a EMPA, a Sociedade para Pesquisa em Dormente de Ferrovia de Madeira (em alemão *Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau*), a empresa *Technologica GmbH* e a consultoria suíça Meio Ambiente e Desenvolvimento (em alemão *Umwelt & Entwicklung*). Nesse novo estudo foram incorporadas as melhoras realizadas nesses últimos anos ao longo do processo produtivo dos dormentes, da redução da quantidade de material necessário na construção de ferrovias que utilizam dormentes de madeira e do volume de preservantes aplicados no tratamento da madeira, o que reduziu significativamente o seu impacto para o meio ambiente. O potencial de reciclagem dos dormentes de aço ou até mesmo de outros produtos para fabricação desses dormentes contribui para reduzir o seu impacto ambiental total. No estudo é reforçado o argumento de que o tempo de uso dos dormentes, a construção e a manutenção da ferrovia são fundamentais na análise comparativa de todas as categorias de impacto ambiental para cada matéria-prima analisada. Os dormentes de aço (sem ser de material reciclado) são os que apresentaram maior impacto ambiental em todas as categorias avaliadas. Mas quando a reciclagem dos materiais é considerada, os dormentes de concreto são os que mais impactam o meio ambiente, em segundo os de aço e em terceiro os de madeira (foi encontrada pequena diferença entre os dormentes de madeira de Carvalho e de Faia). Assim, com relação à manutenção dos dormentes, os de concreto apresentaram maior impacto ambiental em todas as categorias, seguido pelos de aço e por último os fabricados com madeira. Foi verificado que as emissões evitadas pela substituição energética para aproveitamento térmico da queima da madeira impregnada no lugar de combustíveis fósseis são maiores do que as emissões diretas ocorridas ao longo do ciclo de vida desses dormentes, influenciando

¹³ Compostos fenólicos: função orgânica que podem ser obtidos principalmente através da extração de óleos a partir do alcatrão de hulha (WIKIPÉDIA, 2009).

principalmente as categorias de “Potencial de aquecimento global¹⁴”, “Fumaça fotoquímica¹⁵” e “Depleção do ozônio¹⁶”. Sendo assim, como a madeira na Alemanha é proveniente de floresta plantada, o dormente de madeira não só pode ser considerado carbono neutro, mas como também um recurso energético renovável substituto aos não-renováveis que atualmente são mais utilizados. Quando comparado ao concreto, a madeira apresentou maior impacto apenas na categoria “Eutrofização” e ao aço em duas categorias, “Eutrofização” e “Ecotoxicidade aquática¹⁷” (WERNER, 2008).

Entretanto, não foi encontrado até o momento, nenhum estudo que compara a aplicação dos produtos feitos de madeira plástica e de madeira natural para serem utilizados como matéria-prima na fabricação de produtos da indústria ferroviária.

¹⁴ Ver item 4.2.7.

¹⁵ Fumaça fotoquímica: ou mais conhecido como “smog”, mistura de “smoke” (fumaça) com “fog” (neblina). Poluição atmosférica que ocorre em função, basicamente, das emissões dos automóveis e dos processos de combustão das industriais. A combinação de óxido de nitrogênio (NOx), dos compostos voláteis orgânicos (VOC), de dióxido de sulfureto, dos aerossóis ácidos e gases formam uma névoa que reagem com a luz solar produzindo o “smog” (LEMOS & BARROS, 2006).

¹⁶ Ver item 4.2.7.

¹⁷ Ver item 4.2.7.

4 Metodologia do Estudo da Avaliação do Ciclo de Vida dos Dormentes

A metodologia utilizada para a elaboração da Avaliação do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha foi definida com base na ferramenta ACV. Inicialmente neste capítulo, é apresentada a estrutura da ACV e, em seguida, é descrita a Fase 1 para este estudo.

4.1 Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida

Este item foi elaborado com base nas normas ABNT NBR ISO 14040 (2009), ABNT NBR ISO 14044 (2009) e ISO (2009) e nas referências CHEHEBE (2002), MCDOUGALL et al. (2001), MOURAD (2002) e LEMOS (2006).

De acordo com as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (2009) um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida é dividido em 4 fases como ilustrado na Figura 15 e descrito a seguir.

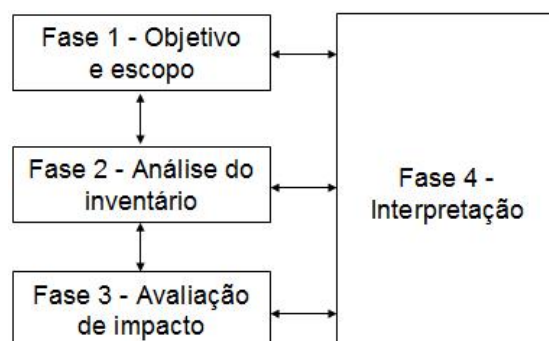


Figura 15 – Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte: ABNT 14040, 2009.

- Fase 1: Definição do objetivo e do escopo – Nesta fase foi definido o planejamento do estudo com base no seu objetivo, escopo, sistema do produto (conjunto de unidades de processo ou etapas do ciclo de vida), fronteira do sistema do produto, unidade funcional, público-alvo, procedimentos e definição da base de dados e como foi realizada a sua coleta. Também foram definidas as categorias de impacto ambiental analisadas no estudo e apresentado o formato de divulgação dos resultados. Para garantir a qualidade dos dados foi preciso considerar os

aspectos temporais (como o ano dos dados observados), geográficos (local e global) e tecnológicos (tecnologias existentes e em desenvolvimento). O objetivo do trabalho foi definido no Capítulo 2, separado do escopo, pois este trabalho está sendo desenvolvido como um trabalho acadêmico (tese de doutorado). Em trabalhos comerciais o objetivo e o escopo, geralmente, são apresentados juntos.

- Fase 2: Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) – ou elaboração do ICV do produto ou do serviço analisado. Nesta fase foram feitos o levantamento dos parâmetros e a coleta dos dados. Foram contabilizados os recursos (materiais e naturais renováveis e não-renováveis) consumidos ao longo de todo o ciclo de vida – caracterizados como dados de entrada (*inputs*) - e a geração das emissões para o ar, dos resíduos sólidos para o solo e dos efluentes líquidos para a água - denominados de dados de saída (*output*).
- Fase 3: Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) – Nesta fase foi feita uma análise quantitativa e qualitativa do ICV. Os dados de saída foram caracterizados segundo uma base funcional e, em seguida, foram classificados a uma categoria de impacto ambiental.
- Fase 4: Interpretação do ciclo de vida – Esta última etapa consistiu na identificação e na avaliação dos resultados obtidos na análise do ICV (Fase 2) e da AICV (Fase 3) de acordo com o objetivo previamente definido na Fase 1. Nesta etapa ainda foi feita a análise de cenários utilizando os resultados das fases anteriores, variando determinados parâmetros e assumindo diferentes suposições para cada um deles. Assim, chegou-se às conclusões e recomendações que serão disponibilizadas para o público-alvo (também estabelecido na Fase 1).

Como a ACV é uma ferramenta em que as etapas interagem, recomenda-se que a Fase 1 seja revista e atualizada de acordo com as modificações feitas ao longo do estudo e com as novas interpretações com o melhor entendimento do assunto.

4.2 Definição do objetivo e do escopo – Fase 1

Tradicionalmente, como apresentado no item anterior, a primeira etapa de uma ACV inclui o objetivo e o escopo do estudo. Contudo, tratando-se de uma tese acadêmica, decidiu-se dar uma ênfase maior ao objetivo, colocando-o em um capítulo à parte (Capítulo 2). Dessa forma, aqui foi delimitado somente o escopo do estudo da ACV dos dormentes de ferrovia fabricados, instalados e descartados nos dois países.

Essa fase inclui a definição do público-alvo, do dormente (produto do estudo), do sistema deste produto e a sua fronteira, da unidade funcional, do *software* de ACV utilizado, do levantamento e preparação dos dados, das categorias de impacto escolhidas para serem analisadas e como os resultados serão divulgados.

4.2.1 Público-alvo

Como público-alvo pretendido no estudo pode ser listado:

- Empresas fabricantes de dormentes ferroviários, que terão uma visão mais detalhada dos recursos totais consumidos e, conseqüentemente, do impacto ambiental em cada etapa do processo produtivo desses artefatos.
- Empresas do setor ferroviário, especialmente os operadores e controladores da via permanente, que a partir desse trabalho terão uma visão holística de um importante elemento da linha férrea, fabricado com duas matérias-primas distintas que possibilita a identificação dos potenciais impactos ambientais ao longo de cada etapa do ciclo de vida.
- Instituições de pesquisas e universidades que estudam gestão de resíduos sólidos e o setor ferroviário, que poderão usar os dados, os resultados, as informações e as sugestões aqui apresentados para o desenvolvimento de outros estudos nessas áreas.
- Agentes reguladores, que com o apoio dos gestores de resíduos sólidos, tanto do serviço público como de empresas privadas, poderão identificar as dificuldades e as deficiências no gerenciamento dos materiais descartados, principalmente no Brasil, para criar incentivos financeiros e oportunidades para o mercado de reciclagem.

- Designers e fabricantes de produtos não só de madeira natural, mas também de concreto, aço, entre outros materiais que possam ser substituídos pela madeira plástica, que atendam as mesmas especificações e apresentem as mesmas características do produto a ser substituído.
- Consumidores em geral, sociedade e empresas, que poderão estimular a compra de materiais reciclados e exigir do poder público, leis que incentivem o consumo e a produção dos materiais reciclados.

Contudo, a análise comparativa das ACVs elaboradas neste estudo poderá oferecer uma reflexão sobre o impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida dos dormentes. Além disso, também disponibiliza informações e dados que podem ser utilizados como parte do processo de tomada de decisão, visando futuras melhorias no setor ferroviário e na gestão de resíduos sólidos em ambos os países.

4.2.2 Descrição do produto

Os dormentes de ferrovia fabricados de madeira natural e de madeira plástica são os produtos estudados nesse trabalho. O comércio da madeira natural já está estabelecido tanto no Brasil como na Alemanha. Entretanto, o de madeira plástica ainda é incipiente nesses dois países.

4.2.2.1 Brasil

O dormente de ferrovia é classificado pela norma brasileira ABNT NBR 7511 (2005) como uma peça estrutural da via férrea, onde os trilhos são apoiados e fixados e que transmitem ao lastro ou à plataforma rígida parte dos esforços recebidos pelas rodas dos vagões em movimento longitudinal, mantendo a bitola da via e a inclinação dos trilhos (ABNT, 2005; ANTF, 2009).

No Brasil, 90% da malha ferroviária comportam dormentes fabricados com madeira natural. As madeiras mais utilizadas são as nativas mais nobres e resistentes, como aroeira, faveiro, jacarandá, ipê, angico e maçaranduba provenientes da Floresta Amazônica (ASSAD, 2007; FARIA, 2006).

As madeiras mais moles (Eucalipto e Pinus) recebem tratamento químico para servirem como dormente de ferrovia com vida útil de apenas 5-7 anos. A preferência das ferrovias nacionais tem sido pela compra e pela instalação de dormentes com as

quatro faces¹⁸ do cerne¹⁹ da madeira nobre. A partir do cerne dessas árvores é possível fabricar de dois a três dormentes retangulares de quatro faces (SUPERVIA, 2008). Esse material por apresentar mais resistência e densidade não precisa de tratamento e tem vida útil de 20 anos (MRS, 2008; SUPERVIA, 2008).

Segundo BIRNA (1983) o alburno é a parte mais clara que contém as células responsáveis pela transferência da água e dos nutrientes para as plantas e, posteriormente, por conduzir a seiva para todas as partes da planta. O cerne é mais escuro e não possui função vegetativa, apenas estrutural (ou mecânica). Com o crescimento da planta, os seus vasos lenhosos vão se tornando inativos e passando de alburno para cerne. As paredes celulares do cerne são impregnadas de substâncias que inibem o ataque dos microorganismos às plantas e são pouco permeáveis aos agentes preservantes da madeira. O cerne apresenta uma maior durabilidade do que o alburno. A Figura 16 mostra o alburno (parte mais branca) e o cerne (parte mais escura) de uma árvore de Carvalho.



Figura 16 – Alburno (parte mais branca) e cerne do Carvalho (parte mais escura)

Foto: Ana Claudia Nioac de Salles, empresa Echtle, Nordrach, Alemanha, 2008.

Os dormentes de madeira plástica considerados neste estudo foram os produzidos pela recicladora brasileira *Wisewood*, utilizando polietileno de alta densidade pós-consumo misturado à fibra de vidro pós-industrial e a alguns aditivos. A formulação desenvolvida (sob sigilo da empresa) garante as mesmas propriedades mecânicas

¹⁸ Segundo a ABNT NBR 7511:2005 face significa cada uma das superfícies longitudinais do dormente (ABNT, 2005).

¹⁹ Segundo a ABNT NBR 7511:2005 o cerne da árvore é a parte interna do lenho, envolvida por alburno (branco da madeira situado entre a casca e o cerne constituído por elementos celulares ativos, responsável por conduzir água e nutrientes para as folhas), constituída por elementos celulares sem atividade fisiológica, geralmente com coloração mais escura que o alburno (ABNT, 2005).

(como elasticidade, dureza, resistência e deformação) e de alongamento (elasticidade) da madeira nobre (WISEWOOD, 2008).

As dimensões dos dormentes de ferrovia variam de acordo com sua aplicação que depende da carga, da velocidade do trem e do raio das curvas da ferrovia. Sendo assim, as características dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica estudadas no caso brasileiro foram baseadas nas informações disponibilizadas em ABNT (2005), ASSAD (2007), SETTI (2008) e WISEWOOD (2009).

Para fins de comparação entre as duas matérias-primas analisadas nesta tese, foram considerados dormentes de madeira natural e de madeira plástica com as mesmas dimensões, equivalentes àsquelas dos dormentes fabricados pela recicladora *Wisewood* destinados a substituir os dormentes de madeira natural. Esses dormentes apresentam bitola métrica de 1,60, conforme apresentado anteriormente no Capítulo 3. As dimensões desse dormente de madeira plástica de 98 kg são de 2,80 m x 0,24 m x 0,17 m ou 0,114 m³, de acordo com a norma ABNT NBR 7511 (2005) (WISEWOOD, 2008). No livro de ASSAD (2007) também são apresentadas essas mesmas dimensões para os dormentes de plástico reciclado, medidas idênticas aos de madeira para bitola larga. O peso do dormente feito de madeira natural assumido no trabalho foi de 86 kg, segundo as propriedades estabelecidas para a classe I das madeiras para dormentes na norma ABNT NBR 7511(2005).

As dimensões citadas acima são as mesmas que a empresa *Wisewood* forneceu a MRS Logística 400 dormentes para serem instalados nos trechos de Mendes e de Barra do Piraí, no Rio de Janeiro no final de 2008.

4.2.2.2 Alemanha

A madeira considerada no estudo é extraída das florestas plantadas espalhadas por todo o território alemão. As espécies mais utilizadas para produzir os dormentes são a Faia (gênero *Fagus*) e o Carvalho (gênero *Quercus*), ambos pertencentes à família *Fagaceae* e nativas da região temperada da Europa e da América do Norte. Todas as madeiras para serem vendidas precisam ser certificadas pelo Programa para Endosso de Esquemas de Certificação Florestal (em inglês *Programme for Endorsement of Forest Certification Schemes - PEFC*). A Faia não é uma madeira tão dura quanto o Carvalho, mas como custa quase a metade (Faia - 250 € / m³ e Carvalho - 400 € / m³) é a mais utilizada para fabricação dos dormentes. Normalmente, o Carvalho é a madeira mais usada na produção de dormentes de Aparelho de Mudança de Via. A

partir do cerne dessas árvores é possível fabricar dois dormentes retangulares de quatro faces nos padrões exigidos pela norma europeia EN 13145 (2001) (WÜLKINITZ, 2008).

Na Alemanha toda a madeira utilizada para fabricação de dormentes ferroviários é impregnada com algum tipo de preservante, como o creosoto. O processo de impregnação deve obedecer à norma alemã DIN 68811(2007) para impregnação do dormente de madeira e à norma europeia EN 13991(2003) de testes e especificações de impregnação baseados nos padrões definidos pelo Instituto da Europa Ocidental para a Preservação da Madeira (*Western-European Institute for Wood Preservation - WEI*), sob fortes restrições legais (DIN, 2007; EN, 2003).

O creosoto é óleo obtido a partir da destilação do alcatrão da hulha (carvão mineral com cerca de 80% de carbono) e aplicado na madeira através do processo de autoclave²⁰. Nesse processo, o vácuo retira o ar das células da madeira e, em seguida, o produto é aplicado sob pressão preenchendo os espaços vazios (RÜTGERS, 2008). A quantidade aplicada é de 150 kg de creosoto por m³ ou 16,2 kg em cada dormente (WÜLKINITZ, 2008). Esses dormentes de madeira impregnada já são utilizados há mais de 150 anos nas ferrovias alemãs. Este biocida²¹ é um excelente conservante contra o ataque biológico, especialmente para os produtos que estão em permanente contacto com o solo e (ou) com a água, como é o caso dos dormentes ferroviários. O creosoto contém 85% de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs). Algumas destas substâncias, sobretudo o benzo[a]pireno, classificadas como cancerígenas influenciam as categorias ambientais de “toxicidade humana” (efeitos adversos na saúde humana desde irritação nos olhos até o câncer) e “formação de ozônio a partir de reação fotoquímica na atmosfera” (poluição atmosférica das emissões dos automóveis e indústrias) (KÖHLER & KÜNNIGER, 2003).

A madeira impregnada com creosoto após o seu uso como dormente de ferrovia é classificada na Lei Federal Alemã (BGBI. I, Nr. 48, S. 2298) como um resíduo de madeira da categoria A IV. O aproveitamento energético da madeira deve estar de acordo com os níveis de emissão estabelecidos na Lei Federal de Controle da Poluição (em alemão - *Bundes-Immissionsschutzgesetzes*). Esses incineradores não

²⁰ Segundo a ABNT NBR 7511:2005 autoclave é um “recipiente, geralmente cilíndrico, colocado em posição horizontal, equipado com porta para fechamento e dispositivo que permita a impregnação da madeira com preservativo, sob vácuo e pressão” (ABNT, 2005).

²¹ Biocida é uma substância química, de origem natural ou sintética, utilizada para controlar ou eliminar plantas ou organismos vivos considerados nocivos à atividade humana ou à saúde (LEITE, 2007).

são os mesmos que queimam resíduos sólidos urbanos, possuem tratamento mais rigoroso para limpeza dos gases produzidos pela queima dos resíduos (BGBI, 2007).

A madeira plástica analisada no estudo para o caso alemão é fabricada a partir de uma mistura de plásticos, predominantemente de polietileno de alta densidade pós-consumo, reforçado com fibra de vidro pós-industrial e alguns agentes auxiliares para a produção de dormentes ferroviários que atendam ou excedam as propriedades da madeira natural. Apesar de a formulação desse material sintético impactar nos resultados da ACV, assim como no caso brasileiro, ela não pode ser divulgada, mantendo-se sob sigilo do projeto *Railway Sleepers from Mixed Plastic Wastes - RailWaste* (FRAUNHOFER, 2008).

De acordo com esse projeto, liderado pelo instituto de pesquisa alemão *Fraunhofer – Institut Chemische Technologie* (2008), as dimensões assumidas para ambos os dormentes foi de 2,6 m x 0,3 m x 0,2 m para um peso unitário de 80 kg.

4.2.3 Sistema de produto e Fronteira do sistema de produto

Os sistemas de produto e as suas fronteiras no estudo da Avaliação do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica, no Brasil e na Alemanha, foram definidos com base nas informações obtidas a partir de informações de empresas e bibliografia especializada. No sistema de produto é definido o conjunto de unidades de processo (ou etapas do ciclo de vida) conectadas a partir do fluxo de material e de energia entre elas. A fronteira do sistema de produto consiste no estabelecimento das unidades de processo que foram incluídas no sistema para serem modeladas, delimitando, assim, as dimensões do estudo de ACV. Ou seja, definiu-se o início e o fim do estudo, quais subsistemas e o seu nível de detalhamento que foram considerados (MCDUGALL *et al.*, 2001). As legendas das figuras dos sistemas de produto e das fronteiras do sistema de produto podem ser encontradas no Anexo 1.

4.2.3.1 Brasil

O conjunto de unidades de processo do estudo dos dormentes de madeira natural fabricados, instalados e descartados no Brasil foi dividido em 7 etapas do ciclo de vida, citando em cada uma delas o que é realizado e os recursos consumidos, com base nas referências ALBERONI & ARRUDA (2008), MRS (2008) e SUPERVIA (2008). As etapas estão listadas a seguir:

1. Floresta nativa – O local onde ocorre o corte de árvores é a Floresta Amazônica. A gasolina e o óleo lubrificante são utilizados como combustíveis pelas motosserras.
2. Transporte – Os troncos que são cortados na floresta nativa são transportados para as serrarias que se localizam nas proximidades da floresta. O óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck*, responsáveis por esse transporte.
3. Serraria – Os troncos obtidos do corte das florestas nativas são transformados em madeira serrada. Energia elétrica da rede é consumida e gás liquefeito de petróleo (GLP) é utilizado como combustível pelas empilhadeiras para transportar a madeira e outros materiais dentro da serraria.
4. Transporte – A madeira serrada é transportada das serrarias para as indústrias de transformação dos dormentes de ferrovia. O óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck*, responsáveis por esse transporte.
5. Indústria de transformação – Fabricação dos dormentes de ferrovia a partir da madeira natural. Energia elétrica da rede é consumida na indústria e gás liquefeito de petróleo (GLP) é utilizado como combustível pelas empilhadeiras para transportar os dormentes, a madeira serrada e outros materiais dentro da indústria.
6. Uso do produto/Ferrovia – Os dormentes são distribuídos para serem instalados nas ferrovias brasileiras que abrangem basicamente as regiões sul, sudeste e nordeste do país.
7. Destinação – A madeira nobre não tratada é queimada em fornos de olaria ou domésticos em fazendas nas proximidades da ferrovia. No Brasil não existe nenhuma legislação que regule a destinação final desses materiais.

Como neste estudo é feita uma análise comparativa entre duas matérias-primas para a fabricação de um mesmo produto, não estão sendo consideradas as etapas de distribuição dos dormentes da indústria de transformação para a ferrovia e do seu recolhimento das ferrovias para a destinação final. Em ambas as etapas o óleo combustível é consumido pelos caminhões, que são responsáveis por esses transportes. Essa consideração foi assumida para os quatro ICVs.

Na Figura 17 estão ilustradas as etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema dos dormentes ferroviários de madeira natural fabricados, utilizados e descartados no Brasil, construídas usando o GaBi software. Em cada unidade de processo foram contabilizados os *inputs* e *outputs* dos inventários do ciclo de vida considerados no estudo. Maiores detalhes com relação às figuras e os inventários considerados nessa fronteira do sistema dos dormentes de madeira natural podem ser obtidos no Anexo 1.

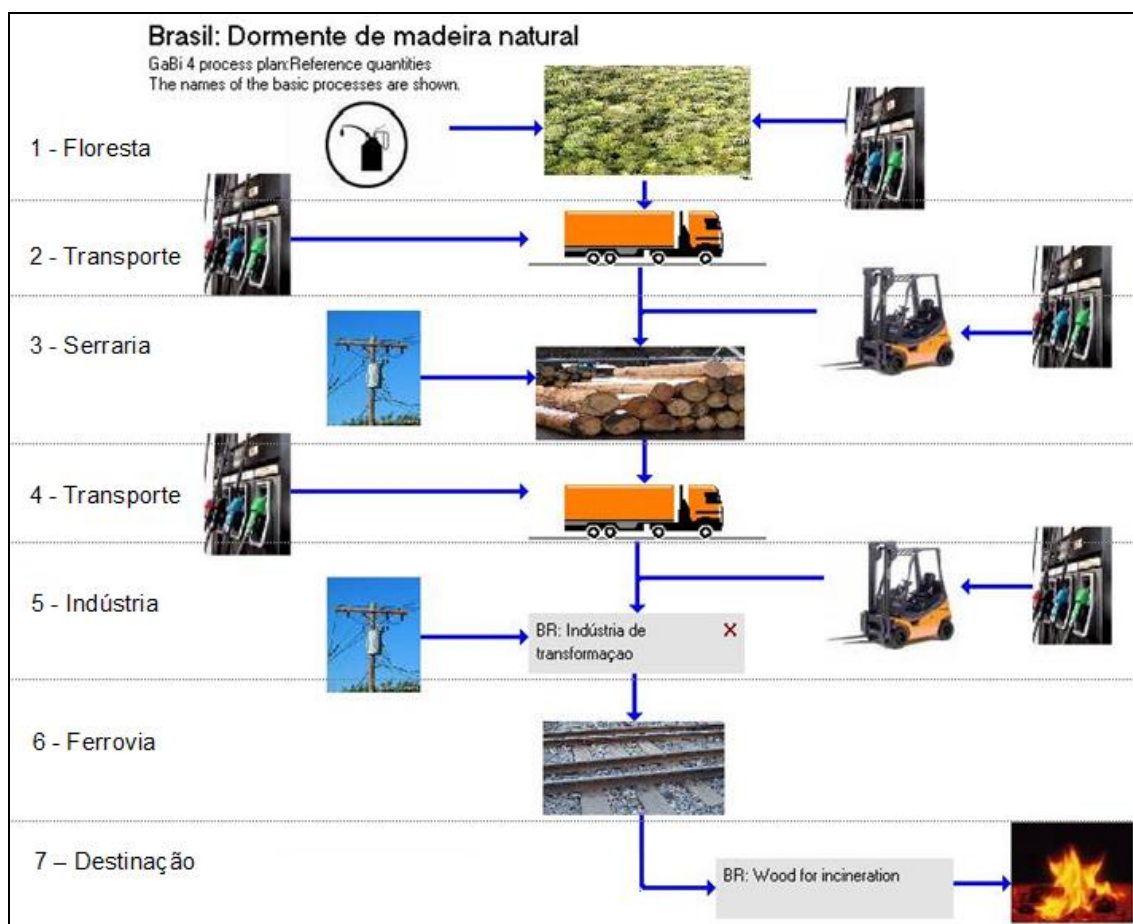


Figura 17 – “Plano de processo” do GaBi com as sete etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema do dormente de madeira natural no Brasil

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A seguir, são listadas as 6 unidade de processo do ICV dos dormentes de madeira plástica para serem produzidos, instalados e descartados no Brasil baseado em WISEWOOD (2008):

1. Transporte – Os resíduos plásticos descartados de pós-consumo são coletados pelas cooperativas e sucateiros, que se localizam nas proximidades dos centros consumidores, a partir do sistema de coleta seletiva dos materiais

recicláveis. Óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck*.

2. Usina de triagem – Os materiais recicláveis obtidos pelas cooperativas são encaminhados às usinas de triagem para preparação dos fardos dos resíduos plásticos. Energia elétrica da rede é consumida pela prensa e outras demandas internas da usina para preparação dos fardos de plástico reciclável.
3. Transporte – Os fardos de plástico reciclável são transportados para as indústrias de reciclagem, que se localizam no máximo a 100 km da cooperativa. A fibra de vidro - classificada como resíduo pós-industrial - os aditivos - que representam uma quantidade muito insignificante quando comparado aos outros materiais -, também são transportados à recicladora para fabricação dos dormentes. Óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck*.
4. Indústria de reciclagem – A transformação de resíduos plásticos pós-consumo, de fibra de vidro pós-industrial e de alguns aditivos plásticos em dormentes de ferrovia é realizada na indústria recicladora. Os materiais são recebidos, enfardados e já separados por tipo de plástico. Os plásticos que estiverem sujos passarão por uma linha de lavagem, moagem e secagem. Os plásticos limpos entrarão direto na linha de moagem. O gás natural é utilizado no aquecedor de fluído térmico (para aquecer os moldes da intrusora para fabricação dos dormentes); gás liquefeito de petróleo (GLP) é utilizado nas empilhadeiras para transportar os dormentes e as matérias-primas dentro da fábrica e utilizado no gerador elétrico para atender a operação nos horários de pico; energia elétrica da rede é consumida para os outros usos na recicladora e óleo diesel é utilizado como combustível pelos tratores de descarregamento.
5. Uso do produto/Ferrovia – Os dormentes são distribuídos para serem instalados nas ferrovias brasileiras que abrangem basicamente as regiões sul, sudeste e nordeste do país.
6. Destinação – A expectativa é de que os dormentes retornem para a indústria de reciclagem para servirem como matéria-prima de novos dormentes.

Na Figura 18 estão ilustrados o conjunto das unidades de processo e a fronteira do sistema “esperada” para os dormentes ferroviários de madeira plástica no Brasil, uma

vez que esses dormentes ainda estão em fase de teste nas ferrovias brasileiras. Em cada unidade de processo foram contabilizados os *inputs* e *outputs* dos inventários do ciclo de vida considerados no estudo. A sexta e última etapa é ilustrada pela seta cinza e branca.

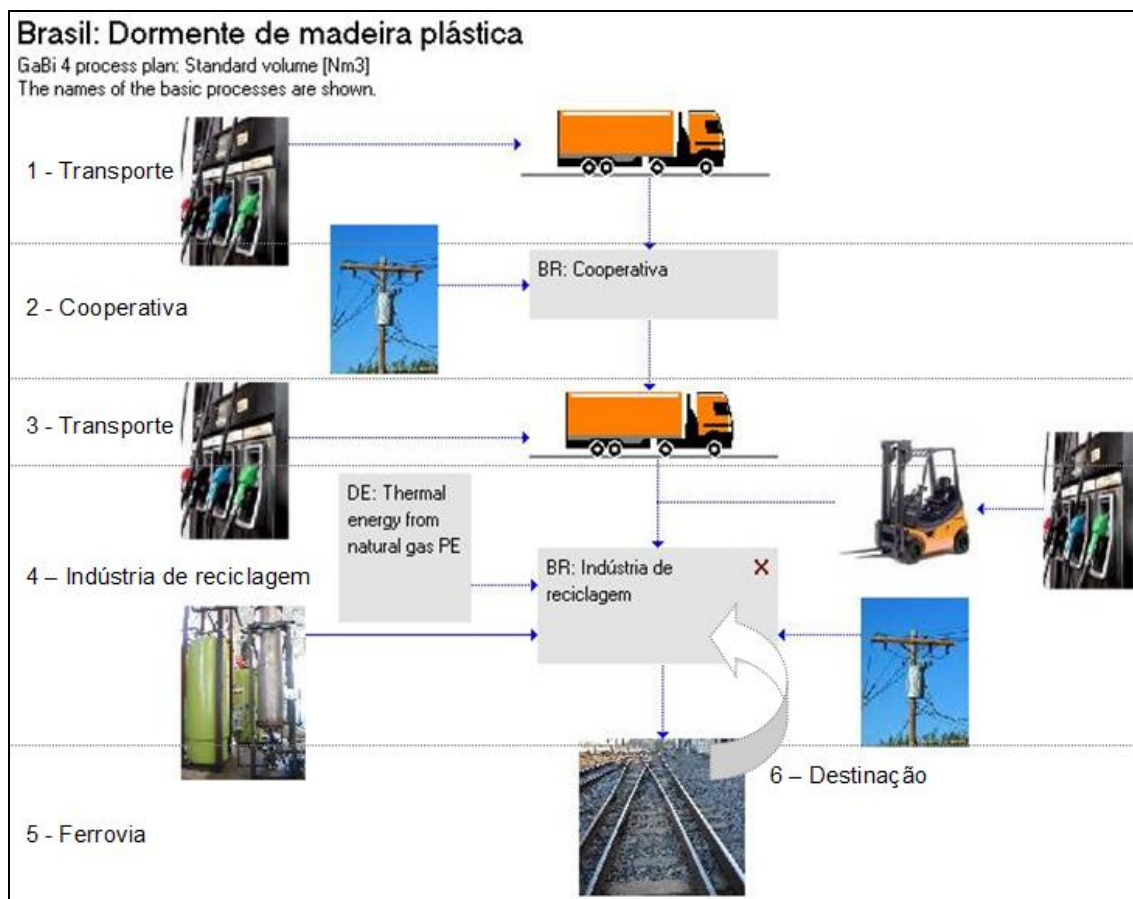


Figura 18 – “Plano de processo” do GaBi com as seis etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema do dormente de madeira plástica no Brasil

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A unidade de processo da queima do gás natural utilizado no aquecedor de fluído térmico é representada por duas figuras. Uma que ilustra a queima do gás natural - “Thermal energy from natural gas PE” disponível no GaBi database (GABlg, 2009) e o ICV do gás natural na refinaria - Figura 18 (foto do boiler verde na etapa 4). Maiores detalhes podem ser encontrados no item 4.2.6 e no Anexo 1.

No processo dos produtos de madeira plástica espera-se que o material ao final da vida útil retorne à indústria de reciclagem (TIETEK, 2008; WISEWOOD 2008). Como esse material descartado servirá novamente como matéria-prima para fabricar outro dormente de ferrovia, o ciclo de vida dos dormentes de madeira plástica foi

considerado como um sistema de produção de “ciclo fechado” (em inglês *closed-loop production system*) com base na ABNT NBR ISO 14044 (2009).

Mas, se os dormentes fossem utilizados para fabricar outro produto, o sistema de produção seria definido como “ciclo aberto” (em inglês *open-loop production system*). Contudo, a reciclagem mecânica dos materiais, seja ela de ciclo aberto ou fechado, pode ser considerada como um sistema “do berço ao berço”, conforme definição em MCDONOUGH & BRAUNGART (2002).

No entanto, o processo relacionado à madeira natural foi classificado como um sistema de produção “do berço ao túmulo”. Isto porque as árvores nativas utilizadas na produção de dormentes ferroviários não foram plantadas para este fim específico e são queimadas ao final da sua vida útil como dormentes de ferrovia.

Como este estudo se propõe a realizar uma análise comparativa entre duas matérias-primas, madeira natural e a madeira plástica, para a fabricação de um mesmo produto, dormente de ferrovia, que apresentem propriedades físicas e mecânicas semelhantes, não estão sendo consideradas as emissões provenientes da construção da via férrea; da instalação e manutenção dos dormentes; do consumo de diesel pelos caminhões na sua distribuição para serem instalados nas vias férreas e no seu recolhimento após o tempo de uso; uma vez que essas etapas são semelhantes para os dois tipos de produto.

Além disso, também não foram contabilizados os fluxos de energia e de material da construção das serrarias, dos fornos, das cooperativas de resíduos sólidos e das indústrias de reciclagem; da fabricação das motosserras, dos caminhões e das empilhadeiras; e da mudança de uso da terra ocasionada pelo corte das árvores na Floresta Amazônica.

4.2.3.2 Alemanha

O sistema de produto definido para o Inventário do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira natural instalados nas ferrovias alemãs foi dividido em 7 unidades de processo, citando em cada uma delas o que é realizado e os recursos consumidos, com base em ECHTLE (2008) e WÜLK NITZ (2008), como pode ser verificado a seguir:

1. Floresta plantada – O corte de árvores ocorre nas florestas plantadas espalhadas por todo o território alemão. Gasolina e óleo lubrificante são utilizados como combustíveis pelas motosserras.
2. Transporte – Os troncos que são cortados nas florestas plantadas são transportados para as serrarias que se localizam nas proximidades da floresta. Óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck*.
3. Serraria – Os troncos obtidos do corte das florestas plantadas são transformados em madeira serrada. Na própria serraria especializada, os dormentes de ferrovia são fabricados a partir da madeira natural. Energia elétrica da rede é consumida na serraria e óleo diesel é utilizado como combustível nas empilhadeiras para transportar a madeira e outros materiais dentro da serraria.
4. Transporte – Os dormentes de ferrovia são transportados das serrarias para as indústrias de impregnação da madeira com creosoto, espalhadas por todo território alemão. Óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck*.
5. Indústria de impregnação – Obtenção do dormente de ferrovia e do creosoto (também fabricado na Alemanha) para sua impregnação na madeira. Energia elétrica da rede é consumida, óleo diesel é consumido como combustível pelas empilhadeiras para transportar os dormentes e outros materiais dentro da indústria. Gás natural é consumido nos *boilers* (também denominados de caldeiras ou reservatórios térmicos) no sistema de impregnação.
6. Uso do produto/Ferrovia – Os dormentes são distribuídos diretamente da indústria de impregnação para serem instalados nas ferrovias alemãs, que atendem todo o território do país.
7. Destinação – A madeira impregnada é queimada em incineradores com tratamento de gases para produzir energia.

Na Figura 19 são apresentados o conjunto das unidades de processo e a fronteira do sistema dos dormentes ferroviários de madeira natural fabricados, utilizados e descartados na Alemanha. Em cada etapa foram contabilizados os *inputs* e *outputs* dos inventários do ciclo de vida considerados no estudo.

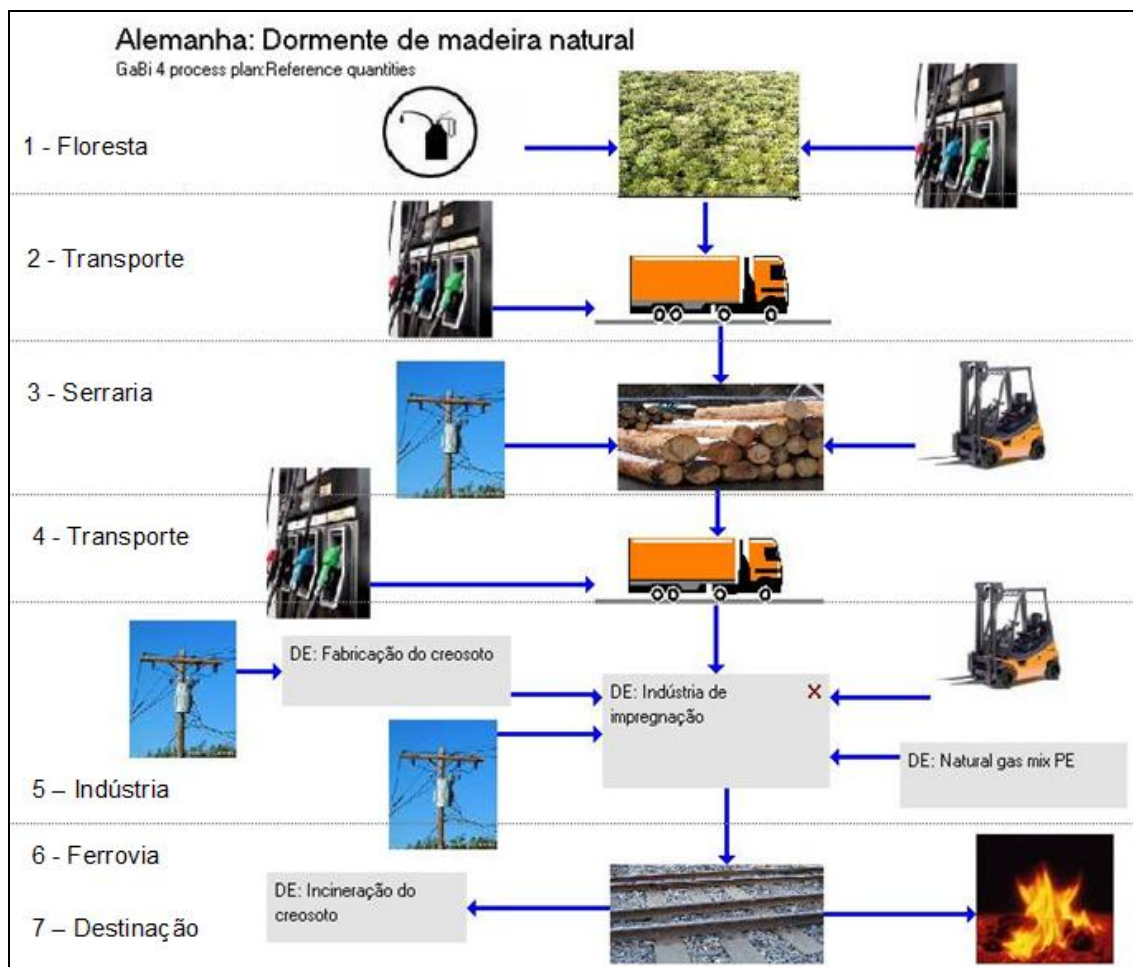


Figura 19 – “Plano de processo” do GaBi com as sete etapas do ciclo de vida e a fronteira do sistema do dormente de madeira natural na Alemanha

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

As 6 unidades de processo da ACV dos dormentes de madeira plástica a serem produzidos, instalados e descartados na Alemanha estão listados a seguir com base em BAYER (2008), FRAUNHOFER (2008), JAKOB BECKER (2008), NEHLSSEN (2008), NGR (2008) e TIETEK (2008):

1. Transporte - Os resíduos plásticos pós-consumo são coletados a partir do sistema de coleta seletiva dos materiais recicláveis pelas empresas participantes do *Dual System Deutschland*, que entregam esses materiais às plantas de triagem que se localizam nas proximidades dos centros consumidores. Óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck* para o transporte dos resíduos plásticos.
2. Usina de triagem - Os materiais recicláveis obtidos pelas empresas participantes do DSD são encaminhados às usinas de triagem para preparação

dos fardos dos resíduos plásticos. Energia elétrica da rede é consumida pelas máquinas de separação dos materiais e pela prensa para elaboração dos fardos. Óleo diesel é utilizado como combustível pelas empilhadeiras e pelos tratores para transportar os materiais e os fardos dentro da estação de triagem.

3. Transporte – Os fardos de plástico reciclável são transportados para as indústrias de reciclagem, que se localizam próximo à usina de triagem. A fibra de vidro pós-consumo e os aditivos - que representam uma quantidade muito pequena quando comparado aos outros materiais – também são transportados para as indústrias de reciclagem. Óleo diesel é utilizado como combustível pelos caminhões tipo *truck* para transporte dos fardos..
4. Indústria de reciclagem – A fabricação dos dormentes de ferrovia é realizada a partir de resíduos plásticos pós-consumo, fibra de vidro pós-consumo e alguns aditivos. Os materiais são recebidos enfardados e separados por tipo de plástico. Os plásticos que estiverem sujos passarão por uma linha de lavagem, moagem e secagem. Os plásticos limpos entrarão direto na linha de moagem. Energia elétrica da rede é consumida pela recicladora e óleo diesel é consumido como combustível pelas empilhadeiras para transportar os dormentes e as matérias-primas dentro da indústria.
5. Uso do produto/Ferrovia – Os dormentes são distribuídos para serem instalados nas ferrovias alemãs que atendem todo o território do país.
6. Destinação – A expectativa é de que os dormentes sejam queimados em incineradores para produção de energia.

Na Figura 20 estão ilustradas as unidades de processo e a fronteira do sistema “esperada” para os dormentes ferroviários de madeira plástica fabricados, utilizados e descartados na Alemanha, uma vez esses dormentes também se encontram em fase de desenvolvimento e de testes. Em cada etapa foram contabilizados os *inputs* e *outputs* dos inventários do ciclo de vida considerados no estudo.

que serão destinados para as plantas de incineração com aproveitamento energético (idem; NGR, 2008). Nesse sentido, o sistema de produção dessas unidades também foi considerado como um sistema “do berço ao túmulo”.

Sendo assim, tanto o sistema de produção do dormente de madeira natural como o de madeira plástica foram considerados como “ciclo aberto”.

Como já apresentado no caso brasileiro, este estudo realiza uma análise comparativa entre duas matérias-primas para a fabricação de dormente de ferrovia. Não se consideram, assim, as emissões provenientes da construção da via férrea; da instalação e manutenção dos dormentes; do consumo de diesel pelos caminhões na sua distribuição para serem instalados nas vias férreas e no seu recolhimento após o tempo de uso; uma vez que essas etapas são as mesmas para os dois tipos de matéria-prima.

Além disso, também não foram contabilizados os fluxos de energia e de material da construção das serrarias, dos fornos, das plantas de triagem de resíduos sólidos e das indústrias de reciclagem; da fabricação das motosserras, dos caminhões e das empilhadeiras; e da mudança de uso da terra com o corte das árvores na floresta plantada.

Apesar de as emissões provenientes do transporte dos fardos de plástico para a indústria de reciclagem estar sendo considerado dentro da fronteira do estudo dos dormentes de madeira plástica, esse consumo de combustível fóssil pelos caminhões ocorreria mesmo se esses resíduos fossem destinados para reciclagem energética, prática comum na Alemanha para esses resíduos, conforme já descrito no Capítulo 3.

4.2.4 Unidade funcional

A unidade funcional fornece uma referência para o qual os dados de *input* e *ouput* são relacionados. A unidade funcional definida para este estudo considera um quilômetro de ferrovia com dormentes de madeira natural ou com dormentes de madeira plástica instalados e a vida útil de cada tipo de dormente. Em cada quilômetro são instalados 1.852 dormentes e a vida útil dos dormentes de madeira natural é de 20 anos (no Brasil) e de 30 anos (na Alemanha) e dos dormentes de madeira plástica é de 50 anos nos dois países.

4.2.5 Software de Avaliação do Ciclo de Vida

O software de Avaliação do Ciclo de Vida GaBi 4 (em alemão *Ganzheitliche Bilanzierung*), apresentado no Capítulo 3, foi utilizado para contabilizar os fluxos de entrada e saída dos Inventários do Ciclo de Vida elaborados no estudo. Nele está disponibilizada uma série de dados que foram utilizados no estudo, como será visto no item 4.2.6.

No segundo semestre de 2008, foi firmada uma parceria com o Fraunhofer - Instituto de Tecnologia Química (em alemão *Fraunhofer Institut Chemische Technologie - ICT*) para elaboração do estudo de caso alemão desta tese de doutorado do Programa de Planejamento Energético da COPPE-UFRJ (que também tem orientação do Instituto de Macromolécula Eloisa Mano da UFRJ). Nesse período o Fraunhofer ICT adquiriu uma licença temporária de 6 meses para o projeto *RailWaste* (o qual esta tese participou) e no primeiro semestre de 2009 o Instituto de Macromolécula comprou a licença permanente do GaBi *software*. Essas duas licenças permitiram o uso do GaBi para a elaboração da análise comparativa do ciclo de vida dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha.

4.2.6 Levantamento de dados para Fase 2 (ICV)

Inicialmente, foi feito o levantamento dos parâmetros envolvidos na fabricação, uso e descarte dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica para elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida (Fase 2 da ACV), com base nas etapas e nas fronteiras definidas no item 4.2.3.

Os dados utilizados nesta tese foram, em sua maioria, fornecidos pelas empresas do setor ferroviário e de gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil e na Alemanha e (ou) se encontram no banco de dados disponível no GaBi *software*. Essas empresas foram visitadas e entrevistadas, respondendo a um questionário (no Anexo 2) sobre o consumo dos recursos materiais e naturais (dados de entrada) e sobre os resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões geradas (dados de saída) ao longo do processo analisado.

Para aquisição dos dados e das informações do setor ferroviário e de reciclagem de plástico para elaboração dos ICVs dos dormentes, foram consultadas as seguintes empresas parceiras deste estudo: a recicladora brasileira Wisewood, a fabricante de máquinas austríaca NGR (*Next Generation Recyclingmachines*), o instituto alemão

Fraunhofer ICT, a recicladora PAV – Recyclate e a indústria de triagem alemã Nehlsen. No Brasil, outras empresas visitadas e contactadas foram as do setor ferroviário Alberoni e Arruda, MRS Logística e Supervia; e na Alemanha a serraria Echtle, a indústria de impregnação da madeira Wülknitz, a indústria de triagem do Dual System Jakob Becker, a fabricante do creosoto Rütgers, o departamento responsável pelo desenvolvimento de dormente de aço da Thyssenkrupp e a empresa ferroviária Deutsche Bahn.

Dada a complexidade da elaboração de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida, que requer uma grande quantidade de dados, quando algumas informações não foram fornecidas pelas empresas parceiras nem pelas demais contactadas, e não estavam disponíveis na base de dados do GaBi software²³, recorreu-se à literatura científica especializada. Como foi o caso do Inventário do Ciclo de Vida da fabricação e da queima do creosoto impregnado na madeira natural.

Uma vez definidas as unidades de processo do ciclo de vida e concluída a coleta de dados, foram elaborados os “planos de processo” (*process plans*) no GaBi software (como pode ser visto nas figuras do item 4.2.3). Em cada unidade de processo foram inseridos os dados de entrada e de saída coletados, ligando, assim, os fluxos de massa e de energia ao longo de todo o ciclo de vida dos dormentes.

É importante destacar que as entradas contabilizadas no Inventário do Ciclo de Vida (i.e. o consumo de materiais e de recursos energéticos, como óleo diesel, gasolina e gás natural, entre outros) possuem, por trás de si, processos produtivos anteriores que, dependendo da fronteira de estudo, podem ser contabilizados. Em outras palavras, ao considerar-se o consumo do óleo diesel, é preciso ter em mente que a sua produção envolveu a prospecção, extração e o refino do petróleo, processo esse que também gerou emissões e consumiu recursos.

Isso evidencia a importância da delimitação da fronteira do sistema. Nesta tese, como já explicado no item 4.2.3, não foram contabilizados os fluxos de energia e de material da construção das serrarias, dos fornos, das cooperativas de resíduos sólidos e das indústrias de reciclagem; da fabricação das motosserras, dos caminhões e das empilhadeiras; e da mudança de uso da terra ocasionada pelo corte das árvores.

²³ Apesar de a PE International elaborar e oferecer uma imensa base de dados para diversos países, nem todos estavam disponíveis no GaBi databases adquirido na licença temporária do Fraunhofer ICT e nem na licença permanente do IMA. Essa base de dados é vendida como módulos separadamente.

Sendo assim, cada entrada foi ligada a um inventário disponibilizado no *GaBi databases*. Também foram utilizados os processos disponíveis no *GaBi databases* para calcular os dados de saída provenientes da queima do plástico e da madeira em incineradores e do óleo diesel nos motores dos caminhões.

Nesta tese, foram contabilizados os inventários disponibilizados no GaBi dos recursos energéticos e da rede elétrica brasileira e alemã consumidos ao longo de todo o ciclo de vida dos dormentes.

No entanto, encontrou-se a dificuldade para a aquisição dos Inventários do Ciclo de Vida de determinados parâmetros no estudo brasileiro, o que acarretou em considerações e adaptações para a elaboração dos ICVs dos dormentes ferroviários. Para o ICV do óleo lubrificante fabricado no Brasil, por exemplo, foi considerada a base de dados para 15 países da União Européia (EU-15)²⁴ denominada de *Lubricants at refinery* disponível pela *PE International* no *GaBi databases 2006* (GABla, 2009). O mesmo foi feito para a gasolina, diesel e gás natural do estudo brasileiro, ou seja, foram assumidas as bases de dados da Alemanha disponibilizados no *GaBi databases 2006: Gasoline and Diesel at refinery* (GABlb, 2009; GABlc, 2009); *Natural gás mix – PE International* (GABld, 2009), embora no Brasil já tenham sido elaborados e divulgados os inventários de óleo diesel e gás natural em BORGES (2004) e KULAY (2004).

Isso porque os trabalhos mencionados acima empregaram metodologia diferente daquela utilizada para a elaboração dos inventários disponibilizados no GaBi. Com isso, caso fossem utilizados os resultados desses estudos brasileiros no ICV dos dormentes aqui fabricados, não seria possível a sua comparação com o ICV dos dormentes fabricados na Alemanha.

Da mesma forma, apesar de o Brasil também possuir um inventário da geração e da distribuição da energia elétrica (COLTRO *et al.*, 2003), foram considerados no estudo os Inventários do Ciclo de Vida de energia elétrica do Brasil e da Alemanha elaborados e também disponibilizado pela *PE International* no *GaBi databases 2006* (GABle, 2009). Em COLTRO *et al.* (2003), não foram considerados, por exemplo, os recursos e as energias gastos na construção das plantas de geração de energia elétrica, levados em conta no inventário brasileiro *Power grid mix* disponível pela *PE*

²⁴ EU-15: Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Portugal, Reino Unido e Suécia.

International no GaBi databases 2006. Ou seja, se o inventário brasileiro fosse utilizado e comparado ao alemão, nesse parâmetro específico (energia elétrica), seriam comparados dados com fronteiras do sistema diferentes.

Como informado anteriormente, na contabilização das emissões provenientes da geração de energia térmica a partir da queima do gás natural para ser utilizada no aquecedor de fluido térmico na recicladora brasileira de madeira plástica foram considerados os processos *Natural gas mix* e *Thermal energy from natural gas* e disponíveis pela *PE International no GaBi databases 2006* (GABId, 2009; GABIf, 2009).

Para contabilizar as emissões do óleo diesel nos motores dos caminhões rodados no Brasil e na Alemanha, foi considerado o mesmo inventário elaborado para todos os países, denominado *Truck 20-26 t total capacity / 17,3 t payload – Global*, que também está disponível na base de dados *PE International no GaBi databases 2006* (GABIg, 2009).

No Brasil, as empilhadeiras utilizadas nas fábricas consultadas são movidas a Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Porém, o inventário para o GLP não estava disponível no *GaBi software*, pelo que foi considerado que as mesmas eram movidas a diesel, como na Alemanha, empregando-se para ambos o mesmo ICV *Diesel at refinery – PE International, GaBi databases 2006* (GABIf, 2009).

Da mesma forma, a recicladora de dormentes brasileira utiliza GLP no seu gerador elétrico para atender à operação da fábrica nos horários de pico, pelo que foi considerada a sua equivalência calórica em relação ao gás natural, com base no BEN (2006). Sendo assim, foi aplicado o ICV do gás natural para que esse consumo de GLP pudesse ser contabilizado no ICV dos dormentes de madeira plástica.

Como inventário da incineração da madeira natural no Brasil, foi assumido o processo que queima madeira natural em incineradores com tratamento de gases: *Wood (natural) in waste incinerator* elaborado pela *ELCD/PE International* para os países europeus (GABIf, 2009). Já para o estudo alemão, foi considerado o inventário elaborado e disponível para a Alemanha (GABIf, 2009).

Para queima do plástico no Brasil, foi assumido o inventário da incineração das embalagens plásticas elaborado para Alemanha *Plastic packaging in municipal waste incinerator - PE International, GaBi databases 2006* (GABIf, 2009).

Toda a água consumida na indústria de reciclagem de plástico é tratada a partir de um processo de ozonização e reutilizada. Assim, não foi contabilizado o seu fluxo neste estudo. No entanto, foram levados em consideração a aquisição do polímero floculante (para formação de macroflocos usado no tratamento de efluentes para auxiliar a retirada de impurezas) e o seu transporte para a empresa de reciclagem (WISEWOOD, 2008). O lodo resultante do tratamento da água é encaminhado para o aterro industrial. O seu transporte também foi considerado.

A aquisição dos dados e dos Inventários do Ciclo de Vida para cada parâmetro considerado neste estudo encontra-se resumida na Tabela 10. As fontes dos recursos consumidos em cada etapa do ICV são apresentadas na última coluna.

Tabela 10 – Aquisição dos dados para a elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida do estudo em questão

Parâmetro – país (Brasil e/ou Alemanha)	Nome da base de dados - ICV	Ano de referência da base de dados - ICV	Local da base de dados – ICV	Aplicação neste estudo – país (Brasil e/ou Alemanha)
Caminhão – para Brasil e Alemanha	Truck 20-26 t total capacity / 17,3 t payload – PE International, GaBi databases 2006.	2005	Global	Brasil – tipo de caminhão fornecido pela recicladora Wisewood; Alemanha – tipo de caminhão fornecido pelas indústrias de triagem Nehlsen e Jakob Becker; pela indústria de impregnação da madeira Wülknitz; e pela serraria Echtle.
Creosoto – para Alemanha	KÜNNIGER & RICHTER, 1998; KOHLER & KÜNNIGER, 2003 (ver Tabela 11).	1998 e 2003	Alemanha	Alemanha – consumo fornecido pela indústria de impregnação da madeira Wülknitz e disponível em KÜNNIGER & RICHTER, 1998; KOHLER & KÜNNIGER, 2003; e RÜTGERS, 2008.
Diesel – para Brasil e Alemanha	Diesel at refinery – PE International, GaBi databases 2006.	2003	Alemanha	Brasil - consumo fornecido por uma serraria brasileira e pela recicladora Wisewood; Alemanha – consumo fornecido pela serraria Echtle; pelas empresas de triagem Nehlsen e Jakob Becker; e pela indústria de impregnação da madeira Wülknitz.

Continuação da Tabela 10				
Parâmetro – país (Brasil e/ou Alemanha)	Nome da base de dados - ICV	Ano de referência da base de dados - ICV	Local da base de dados – ICV	Aplicação neste estudo – país (Brasil e/ou Alemanha)
Empilhadeira – para Brasil e Alemanha	Solo truck up to 7,5 t total capacity / 3,3 t payload (short-distance) – PE International, GaBi databases 2006.	2005	Global	Brasil – tipo de empilhadeira fornecido pela recicladora Wisewood; Alemanha – tipo de empilhadeira fornecido pelas indústrias de triagem Nehlsen e Jakob Becker; pela indústria de impregnação da madeira Wülknitz; e pela serraria Echtle.
Energia elétrica - para Alemanha	Power grid mix – ELCD / PE International, GaBi databases 2006.	2002	Alemanha	Alemanha – consumo fornecido pelas indústrias de triagem Nehlsen e Jakob Becker; pela fabricante de máquinas NGR; pela indústria de impregnação da madeira Wülknitz; e disponível em JUNGMEIER <i>et al.</i> (2002).
Energia elétrica – para Brasil	Power grid mix - PE International, GaBi databases 2006.	2002	Brasil	Brasil - consumo fornecido pela recicladora Wisewood; por uma serraria brasileira; e disponível em JUNGMEIER <i>et al.</i> (2002).
Energia térmica – para Brasil	Thermal energy from natural gas – PE International, GaBi databases 2006.	2002	Alemanha	Brasil – volume de gás natural consumido para ser utilizado no aquecedor de fluido térmico e quantidade de energia gerada fornecidos pela recicladora Wisewood.
Gás natural – para Brasil e Alemanha	Natural gas mix – PE International, GaBi databases 2006.	2002	Alemanha	Brasil - consumo fornecido pela recicladora Wisewood; Alemanha – consumo fornecido pela indústria de impregnação da madeira Wülknitz.
Gasolina – para Brasil e Alemanha	Gasoline at refinery – PE International, GaBi databases 2006.	2003	Alemanha	Brasil – consumo fornecido pela fabricante da motosserra da marca Komatsu e por uma serraria brasileira; Alemanha – consumo fornecido pela fabricante da motosserra da marca Stihl e pela serraria Echtle.

Continuação da Tabela 10				
Parâmetro – país (Brasil e/ou Alemanha)	Nome da base de dados - ICV	Ano de referência da base de dados - ICV	Local da base de dados – ICV	Aplicação neste estudo – país (Brasil e/ou Alemanha)
Incineração da madeira natural - para Alemanha	Wood (natural) in waste incinerator - PE International, GaBi databases 2006.	2005	Alemanha	Alemanha – quantidade de madeira destinada para incineração fornecida pela indústria de impregnação da madeira Wülknitz.
Incineração da madeira natural – para Brasil	Wood (natural) in waste incinerator - ELCD / PE International, GaBi databases 2006.	2005	Europa	Brasil – quantidade de madeira destinada para incineração fornecida pelas empresas ferroviária MRS Logística e Supervia; e pela empresa de instalação de dormentes de ferrovia Alberoni e Arruda.
Incineração de embalagem plástica – para Alemanha	Plastic packaging in municipal waste incinerator - PE International, GaBi databases 2006.	2005	Alemanha	Alemanha – quantidade de plástico destinada para incineração fornecida pela indústria de triagem Nehlsen e pela fabricante de máquinas NGR.
Incineração de embalagem plástica – para Brasil	Plastic packaging in municipal waste incinerator - PE International, GaBi databases 2006.	2005	Alemanha	Brasil - quantidade de plástico destinada para incineração foi baseada na produção dos dormentes.
Óleo lubrificante – para Alemanha	Lubricants at refinery – PE International, GaBi databases 2006.	2003	Alemanha	Alemanha – consumo fornecido pelo fabricante da motosserra da marca Stihl e pela serraria Echtle. Para cada litro abastecido, 35% são de óleo lubrificante e 65% de gasolina.
Óleo lubrificante – para Brasil	Lubricants at refinery – PE International, GaBi databases 2006.	2003	UE-15	Brasil – consumo fornecido pelo fabricante da motosserra da marca Komatsu e por uma serraria brasileira. Para cada litro abastecido, 35% são de óleo lubrificante e 65% de gasolina.

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Os consumos relacionados aos parâmetros listados na Tabela 10 foram fornecidos por empresas brasileiras e alemãs, que não permitiram a sua divulgação, por serem parte de dados específicos de seus processos de produção. Os volumes de óleo lubrificante, de gasolina, de energia elétrica e de diesel foram fornecidos por uma serraria do Pará que pediu para não ter o seu nome divulgado no trabalho.

Como a licença adquirida do GaBi *software* não forneceu um Inventário do Ciclo de Vida da fabricação e da queima do creosoto, foi preciso buscar essas emissões na literatura especializada.

Na Tabela 11 são apresentadas as emissões para o ar (não foram encontradas as emissões para a água e solo) do dormente de madeira natural durante e após o processo de impregnação (aplicação do creosoto), enquanto instalado na ferrovia e na queima ao final da sua vida útil. Os valores dos dados foram obtidos de KÜNNIGER & RICHTER (1998) e KOHLER & KÜNNIGER (2003) e inseridos como um processo no GaBi *software* para ser contabilizado no ICV dos dormentes.

Tabela 11 – Emissão para o ar do creosoto (kg)

Composto	Durante impregnação	Após impregnação	Uso como dormente	Na queima	TOTAL (kg/dormente)
*1-Methylnaphthalene	2,48E-03	2,34E-03			4,81E-03
*2-Methylnaphthalene	6,23E-03	5,84E-03			1,21E-02
*Acenaphthene	2,00E-03	1,86E-03	2,84E-01		2,88E-01
*Anthracene	2,29E-05	1,97E-05	4,94E-02		4,94E-02
*Biphenyl	9,72E-04	9,05E-05			1,06E-03
*Dibenzofuran	9,36E-04	8,75E-04			1,81E-03
*Dimethylnaphthalene	1,72E-03	1,62E-03			3,35E-03
*Fluoranthene	4,59E-05	3,94E-05	9,56E-02		9,56E-02
*Fluorene	6,47E-04	6,26E-04	2,14E-01		2,16E-01
*Naphthalene	1,87E-02	1,76E-02	4,92E-01		5,28E-01
*Phenanthrene	1,50E-04	1,29E-04	2,11E-01		2,12E-01
*Pyrene	2,29E-05	1,97E-05	6,07E-02		6,07E-02
*Benz[a]anthracene	1,15E-05	9,86E-06	1,05E-02		1,05E-02
*Chrysene	1,15E-05	9,86E-06	7,60E-03		7,62E-03
*Acenaphthylene			7,00E-04		7,00E-04
*Benzo[a]pyrene			2,00E-01		2,00E-01
*Benzo[b]fluoranthene			2,05E-03		2,05E-03
*Benzo[k]fluoranthene			1,90E-03		1,90E-03
*Dibenz[a,h]anthracene			1,00E-04		1,00E-04
*Benzo[ghi]perylene			3,00E-04		3,00E-04
*Indeno[1,2,3-cd]pyrene			4,50E-04		4,50E-04
Phenol	2,94E-02	1,12E-04	1,74E-02	1,46E-08	4,69E-02
Acetaldehyde				1,10E-04	1,10E-04
Ammonia				7,93E-03	7,93E-03
Arsenic				1,80E-06	1,80E-06

Continuação da Tabela 11					
Composto	Durante impregnação	Após impregnação	Uso como dormente	Na queima	TOTAL (kg/dormente)
Benzen, ethyl-				5,39E-05	5,39E-05
Benzen, hexachloro-				1,29E-09	1,29E-09
Benzene				1,64E-03	1,64E-03
Bromine				1,08E-04	1,08E-04
Cadmium				1,26E-06	1,26E-06
Calcium				1,05E-02	1,05E-02
Carbon dioxide (biogen)				9,88E+01	9,88E+01
Carbon dioxide (fossil)				4,43E+01	4,43E+01
Carbon monoxide				2,45E-02	2,45E-02
Chlorine				3,24E-04	3,24E-04
Chromium				7,13E-06	7,13E-06
Chromium III-wertig				1,41E-04	1,41E-04
Copper				2,64E-05	2,64E-05
Dinitrogen				3,87E-05	3,87E-05
Dioxine				3,85E-11	3,85E-11
Fluorine				8,99E-05	8,99E-05
Formaldehyde				2,33E-04	2,33E-04
Hydrocarbon				3,67E-03	3,67E-03
Hydrochloric acid				9,45E-04	9,45E-04
Hydrogen fluoride				2,64E-06	2,64E-06
Lead				1,76E-05	1,76E-05
Magnesium				6,47E-04	6,47E-04
Manganese				1,50E-04	1,50E-04
Mercury				5,39E-07	5,39E-07
Methane				7,19E-04	7,19E-04
m-Xylene				2,16E-04	2,16E-04
Nickel				1,08E-05	1,08E-05
Nitrogen oxide				6,82E-02	6,82E-02
Nitrous oxide				4,40E-04	4,40E-04
NMVOC				1,08E-03	1,08E-03
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)				2,00E-05	2,00E-05
Particle				5,39E-03	5,39E-03
Phosphorus				5,39E-04	5,39E-04
Potassium				4,21E-02	4,21E-02
Sodium				2,33E-03	2,33E-03
Sulfur oxide				1,85E-02	1,85E-02
Toluene				5,39E-04	5,39E-04
Zinc				1,76E-04	1,76E-04

Elaboração própria com base nas fontes: KÜNNIGER & RICHTER, 1998 KOHLER & KÜNNIGER, 2003. Obs: os compostos de PAH estão marcados com asterisco.

4.2.7 Categorias de impacto ambiental para Fase 3 (AICV)

Uma vez feito o levantamento dos *inputs* para elaboração do Inventário do Ciclo de Vida do dormente, conforme metodologia apresentada nos itens anteriores, os *outputs* para o ar, água e solo calculados pelo GaBi *software* foram agrupados em categorias

de impacto conforme escolha da autora desta tese (Fase 3 da ACV). As 10 categorias de impacto selecionadas para o estudo foram algumas das mais analisadas em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, com base em BAIRD (2002) CONNELL (1997), LEMOS & BARROS (2006) e MCDOUGALL *et al.* (2001). São elas:

1. Potencial de Eutrofização – excesso de nutrientes na água, que eleva a produção de biomassa (crescimento de organismos), reduzindo o nível de oxigênio, deteriorando a qualidade da água e afetando a vida aquática. Nitrogênio, fósforo, amônia, nitratos, nitritos, fosfatos, compostos nitrogenados, óxidos de nitrogênio, resíduos de alimentos, óleos e gorduras são alguns dos elementos que influenciam essa categoria. A descarga de efluentes agrícolas, urbanos e industriais e o manejo florestal são algumas das atividades humanas que contribuem para o enriquecimento dos nutrientes e aceleração da eutrofização. Unidade dessa categoria: quilos de fosfato equivalente (kg Fosfato eq).
2. Potencial de Ecotoxicidade Aquática – introdução direta ou indireta de substâncias no ecossistema que causa algum desequilíbrio aos seres vivos e redução dos recursos abióticos (como combustíveis fósseis e minerais) e bióticos (como madeira e peixe) e da qualidade da água. A descarga de efluentes agrícolas, urbanos e industriais, que liberam elementos químicos (como os hidrocarbonetos aromáticos e metais tóxicos), influencia o sistema aquático. Unidade dessa categoria: quilos de diclorobenzeno equivalente (kg DCB eq).
3. Potencial de Ecotoxicidade Terrestre - introdução direta ou indireta de substâncias no ecossistema que causa algum desequilíbrio aos seres vivos e redução dos recursos abióticos e bióticos. A geração de energia elétrica, a exaustão dos motores dos veículos e a descarga industrial e urbana, que liberam substância (como metais tóxicos, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos) são algumas das atividades que afetam essa categoria. Unidade dessa categoria: quilos de diclorobenzeno equivalente (kg DCB eq).
4. Metais pesados – o arsênio, o cádmio, o chumbo e o mercúrio são alguns dos metais pesados. As operações industriais, as lâmpadas fluorescentes, as termelétricas a carvão e a óleo combustível e os vulcões são algumas das

principais fontes de emissão de metais pesados. Unidade dessa categoria: quilos de chumbo equivalente (kg Pb eq).

5. Potencial de Depleção do Ozônio - redução da camada de ozônio em função da emissão de gases CFCs (clorofluorcarbono) proveniente dos circuitos de refrigeração, solventes, motores de avião entre outros, aumenta a exposição e a incidência dos raios ultravioletas do sol na Terra, causando aumento de câncer de pele e doenças oculares. Unidade dessa categoria: quilos de triclorofluormetano equivalente (gás refrigerante R-11 ou CFC-11) (kg R11 eq).
6. Substâncias cancerígenas – apesar do arsênio, do diclorobenzeno e dos compostos orgânicos clorados também serem substâncias cancerígenas, nessa categoria estão sendo contabilizadas apenas as emissões dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (em inglês *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* - PAH). Os PAHs são emitidos por diversas atividades humanas, dentre elas o uso de preservante da madeira (como creosoto), a queima de combustíveis fósseis e o refinamento do petróleo. Unidade dessa categoria: quilos de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos equivalente (kg PAH eq).
7. Potencial de Acidificação – algumas substâncias potencializam a acidez das precipitações (como a chuva, neblina e neve ácida). Os dois ácidos predominantes na chuva ácida são o sulfúrico e o nítrico, que causam efeitos na saúde humana, na cadeia alimentar, nas florestas e lavouras. As usinas termelétricas a carvão são as principais fontes de emissão do ácido sulfúrico e os veículos do ácido nítrico. Unidade dessa categoria: quilos de dióxido de enxofre equivalente (kg SO₂ eq).
8. Potencial de Toxicidade Humana – certas atividades humanas, como a geração de energia termelétrica (inclusive a incineração de materiais plásticos), emitem determinados elementos (como, por exemplo, níquel, vanádio, arsênio, benzeno, óxido nitroso, selênio, antimônio, fluoreto de hidrogênio e óxido nitroso) que podem causar efeito na saúde humana (como o aumento da incidência de asma e de dificuldade respiratória). Unidade dessa categoria: quilos de diclorobenzeno equivalente (kg DCB eq).
9. Radiação Ionizante – é a radiação que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas. Pode danificar nossas células e afetar o material genético,

causando doenças graves. A radiação eletromagnética ultravioleta ou mais energética é ionizante. Partículas como os elétrons e os prótons que possuam altas energias também são ionizantes. São exemplos de radiação ionizante as partículas alfa, partículas beta (elétrons e pósitrons), os raios gama, raios-x e neutrons. Unidade dessa categoria: quilos de becquerel iodo-129 equivalente²⁵ (kg Bq I129 eq).

10. Aquecimento Global – emissões de gases de efeito estufa provenientes das atividades humanas como o desmatamento, a queima dos combustíveis fósseis, a agricultura, entre outros, que contribuem para o aumento da temperatura média global do planeta. Algumas das consequências do potencial do aquecimento global são: o derretimento das calotas polares; a elevação do nível dos oceanos; o aumento da frequência e da intensidade de inundações e secas. Unidade dessa categoria: quilos de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂e).

O trabalho não se propôs a analisar os elementos químicos individualmente e nem o seu ciclo na natureza. Foram apenas observadas as emissões para o ar, a água e o solo de cada categoria, agrupado pelo GaBi como já informado, e selecionadas aquelas que apresentaram um resultado mais expressivo. Um mesmo elemento químico pode estar inserido em mais de uma categoria de impacto ambiental. Como por exemplo, o dióxido de carbono que influencia o Potencial de Ecotoxicidade Terrestre e Humana e o Aquecimento Global.

No GaBi *software* a categoria de impacto ambiental “Aquecimento Global” é denominada “Potencial de Aquecimento Global”, nome que também será adotado no Capítulo 5 de resultados.

4.2.8 Apresentação dos resultados das Fases 2, 3 e 4

A apresentação dos resultados da Avaliação do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica foi realizada da mesma forma para o Brasil e para a Alemanha, possibilitando, assim, a comparação entre os países. Essa etapa envolve as Fases 2, 3 e 4 da ACV.

²⁵ Segundo o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes a unidade becquerel é a medida do valor esperado do número de transições nucleares espontâneas num estado de energia particular em relação a um determinado intervalo de tempo (LMRI, 2002). O iodo-129 tem vida média de 16 milhões de anos e pode ser produzido a partir do decaimento do urânio 238. Ele tem sido empregado como indicador da dispersão de resíduos no meio ambiente ao observar a presença de atividades relacionadas a energia nuclear em um determinado local (WIKIPEDIA, 2009).

Inicialmente, foram apresentados os quatro Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes elaborados na Fase 2 desta tese. No anexo 4 estão detalhados todos os *output* desses ICVs.

Em seguida, foram apresentadas as emissões totais para o ar, a água e o solo em cada etapa do ciclo de vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica calculados pelo *GaBi software*, considerando os sistemas de produto e as suas fronteiras dos sistemas definidos no item 4.2.3.

Como no caso brasileiro foi considerada a queima da madeira natural no final do seu tempo de uso dentro da fronteira do sistema, somente para fins de verificação, são analisados os impactos nas emissões para o ar quando a madeira natural é considerada uma matéria-prima carbono-neutro²⁶ (C-neutro). Essa análise foi apresentada logo após os resultados das etapas do ICV. No caso da madeira plástica, no qual se espera o retorno do dormente para a indústria de reciclagem, foram verificados os impactos nas emissões para o ar quando é contabilizada a queima da madeira plástica no final do seu tempo de uso como dormente de ferrovia. Essa verificação também foi apresentada após os resultados do ICV.

O mesmo foi feito para o caso alemão do dormente de madeira natural. No entanto, ao contrário do esperado no Brasil, a expectativa na Alemanha é que os dormentes de madeira plástica sejam destinados para as usinas de incineração ao final da vida útil. Sendo assim, foram analisados os impactos nas emissões para o ar quando não se considera a queima da madeira plástica no final do ciclo de vida. Esses resultados foram descritos logo após a apresentação dos resultados do ICV.

Posteriormente, foi realizada a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (Fase 3) utilizando o *GaBi software*, que classifica os *outputs* do ICV dos dormentes em diferentes categorias de impacto ambiental, selecionadas e listadas no item 4.2.7. Nessa etapa são comparadas as principais emissões em cada unidade de processo do Inventário do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira natural no Brasil e na Alemanha e depois para a madeira plástica.

Uma vez verificada a categoria de impacto ambiental mais significativa foi realizada a “Análise de Cenários”, passando para última fase da ACV (Fase 4 de interpretação dos resultados). Nessa etapa foi comparada uma unidade de dormente de madeira

²⁶ Carbono neutro: recurso energético de origem renovável que tem a emissão de carbono oriunda da sua queima compensado pela absorção na produção deste recurso, ou seja, o balanço de carbono é praticamente igual a zero.

natural com uma de madeira plástica, para serem estudadas mais profundamente as emissões mais significativas identificadas na Fase 3. Nesses cenários foram assumidas diferentes suposições que não foram consideradas nos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes. Nos ICVs não foram considerados o parâmetro “vida útil” dos dormentes produzidos com diferentes matérias-primas, a queima dos dormentes em substituição aos combustíveis fósseis no final do tempo de uso para geração de energia elétrica e a sua disposição final no aterro. A fim de avaliar o impacto dessas considerações foram construídos 24 cenários, 12 para cada país, utilizando o ICV de cada dormente, dando ênfase às emissões totais atmosféricas, de três itens mais expressivos (dióxido de carbono, vapor de água e outras emissões) e de gases de efeito estufa.

Os títulos de cada cenário são listados a seguir. O primeiro se refere ao Brasil e o segundo à Alemanha. Para fins de simplificação dos títulos, a madeira natural é chamada de “madeira” e a madeira plástica de “plástico”. Além disso, toda referência à queima ou à disposição dos materiais deve ser entendida como realizada após o término da sua vida útil como dormentes de ferrovia.

- Cenário 1 e Cenário 13 – Considerando a queima da madeira e não do plástico.
- Cenário 2 e Cenário 14 – Considerando a queima da madeira e não do plástico, sendo a madeira C-neutro.
- Cenário 3 e Cenário 15 – Considerando a queima da madeira e do plástico.
- Cenário 4 e Cenário 16 – Considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro.
- Cenário 5 e Cenário 17 – Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica.
- Cenário 6 e Cenário 18 - Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro.
- Cenário 7 e Cenário 19 - Considerando a disposição (final) no aterro de ambos os materiais.

- Cenário 8 e Cenário 20 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes.
- Cenário 9 e Cenário 21 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro.
- Cenário 10 e Cenário 22 - Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes.
- Cenário 11 e Cenário 23 - Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro.
- Cenário 12 e Cenário 24 - Considerando a disposição (final) no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes.

Ainda na Fase 4 da ACV, somente para fins de comparação do ciclo de vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha que contabilize a vida útil dos dormentes, foi selecionado um “Cenário Padrão” para cada país dentre os 12 cenários listados, com base nos ICVs dos dormentes, sendo considerado o mais provável.

Finalmente, foi identificado o cenário mais pessimista e mais otimista dentre os cenários elaborados para avaliar os intervalos de emissão para cada um dos quatro casos.

5 Resultados

Neste capítulo foi realizada a análise do potencial de resíduo plástico disponível no Brasil e na Alemanha que podem ser destinados para fabricação de dormentes de ferrovia. Em seguida foi elaborado os Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica nos dois países (Fase 2), realizada a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) (Fase 3) e a interpretação dos resultados (Fase 4), utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 4.

5.1 Potencial de Resíduo Plástico Disponível

A verificação do potencial de resíduo plástico que poderiam ser destinado para fabricação de dormentes de ferrovia é apresentado primeiramente para o Brasil e, em seguida, para a Alemanha.

5.1.1 Brasil

A análise do potencial do reaproveitamento dos resíduos plásticos constituídos de polietileno de alta densidade (PEAD) para fabricação dos dormentes foi baseada na pesquisa sobre Indústria de Reciclagem Mecânica dos Plásticos no Brasil desenvolvida pela Plastivida, em conjunto com a MaxiQuim Assessoria de Mercado (PLASTIVIDA, 2008).

A pesquisa constatou que das 335 mil toneladas geradas de polietileno de alta densidade pós-consumo em 2005, apenas 16% ou 52 mil toneladas foram recicladas. Ou seja, cerca de 283 mil toneladas foram destinadas a aterros e lixões, quando poderiam ter sido reaproveitadas como matéria-prima para fabricação de produtos, como dormentes de ferrovia, fabricados a partir de madeira plástica.

Considerando a necessidade de reposição anual de 3,6 milhões de dormentes de madeira em toda malha ferroviária brasileira e o peso de 100 kg para cada dormente e 10% de perda de matéria-prima no processo de fabricação dos dormentes de madeira plástica (WISEWOOD, 2008), seriam necessárias 396 mil toneladas de PEAD anualmente para atender toda a demanda por dormentes. Como a formulação desse material sintético, tanto por parte do Brasil quanto da Alemanha, não pode ser

divulgada, a avaliação do potencial de material disponível considerou que o dormente é fabricado com 100% de PEAD.

Sendo assim, o material disponível de PEAD (283 mil toneladas) poderia servir de matéria-prima para atender 71% da demanda anual por dormentes no Brasil. Na Tabela 12 pode ser visto esse potencial de reaproveitamento do polietileno de alta densidade pós-consumo no Brasil.

Tabela 12 - Potencial de reaproveitamento de PEAD no Brasil em 2005

Item analisado	Quantidade (mil t)
Consumo aparente ^a	572
Quantidade descartada ^b	335
Quantidade reciclada ^b	52
Potencial disponível	283
Quantidade necessária para uso em dormentes	396

Elaboração própria com base nas Fontes: ^aABIQUIM, 2006 (Consumo aparente = produção - exportação + importação); ^bPLASTIVIDA, 2008.

Segundo o estudo da *PlasticsEurope* (2008) o consumo de plástico *per capita* em 2005 da América Latina foi de 21 kg e a previsão é que em 2010 aumente para 26 kg, representando também um potencial de geração de matéria-prima disponível para produção de dormentes ferroviários.

Além disso, o potencial de polietileno de alta densidade reciclável poderia ser ainda maior se o sistema de separação e de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos atendesse toda população brasileira. De acordo com a Pesquisa Ciclosoft elaborada pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2008), somente 14% dos brasileiros (cerca de 26 milhões de habitantes) têm acesso ao programa de coleta seletiva no país, ou seja, apenas 405 dos 5.564 municípios brasileiros têm algum tipo de programa de coleta seletivo implantado (IBGE, 2007).

5.1.2 Alemanha

O potencial de resíduos plásticos disponíveis na Alemanha foi verificado com base nas informações apresentadas no Capítulo 3 e na referência FRAUNHOFER (2008). Assim como para os dormentes fabricados com madeira plástica no Brasil, na Alemanha também se espera que a formulação desse material sintético seja composta basicamente de polietileno de alta densidade e nesta verificação de material disponível

também está sendo considerado que o dormente será fabricado com 100% de polietileno de alta densidade pós-consumo. Como no caso brasileiro, a formulação da madeira plástica para esse fim também não pode ser divulgada, mantendo-se sob sigilo das empresas envolvidas no projeto.

Nesse sentido, considerando uma reposição de dormentes de madeira da ordem de 3 milhões por ano, com peso médio de 80 kg de cada unidade e 10% de perda de matéria-prima na produção dos dormentes (NEHLSSEN, 2008), a quantidade anual necessária de PEAD seria de aproximadamente 264 mil toneladas por ano.

Em 2005, das 13 milhões de toneladas de plástico consumidos, 1,5 milhão de toneladas era polietileno de alta densidade (PEAD). Deste total, 556 mil toneladas (38%) foram descartadas e dentre eles, 239 mil toneladas (43%) foram destinadas para reciclagem. Há, portanto, um potencial disponível de 317 mil toneladas de PEAD que poderiam contribuir para atender toda a demanda deste material para fabricação de dormentes de ferrovia na Alemanha. Na Tabela 13 está apresentado esse potencial de reaproveitamento na Alemanha.

Tabela 13 - Potencial de reaproveitamento de PEAD na Alemanha em 2005

Item analisado	Quantidade (mil t)
Consumo aparente ^a	1.470
Quantidade descartada ^b	556
Quantidade reciclada ^b	239
Potencial disponível	317
Quantidade necessária para uso em dormentes	264

Elaboração própria com base nas Fontes: BMU, 2006; CONSULTIC, 2005; FRAUNHOFER (2008); ^aConsumo aparente = produção - exportação + importação.

O consumo de plástico *per capita* em 2005 na Europa Ocidental foi de 100 kg e a expectativa é que em 2010 esse valor cresça para 118 kg (PLASTICSEUROPE, 2008), representando também um potencial de matérias-primas plásticas disponíveis para a produção de dormentes ferroviários fabricados com polímeros.

Apesar de haver previsão de aumento da capacidade instalada das usinas de reciclagem mecânica que poderia atender a esse crescimento, a tendência é que esses materiais sejam destinados cada vez mais para a reciclagem energética, como visto no item 3.4.2.1 – Gerenciamento dos resíduos plásticos (CONSULTIC, 2005). Isso porque o mercado de reciclagem energética na Alemanha está pagando mais

para obtenção do resíduo plástico, além de importar mais resíduos de outros países europeus (FRAUNHOFER, 2008).

5.2 Inventário do Ciclo de Vida dos dormentes – Fase 2

Inicialmente, foram levantados e coletados os dados para serem inseridos no GaBi *software* para elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha, conforme descrito na metodologia apresentada no Capítulo 4. Esses inventários representam as situações mais prováveis em cada um dos dois países com base nas informações e nos dados coletados. Tanto para o Brasil quanto para a Alemanha foi assumida a produção anual de 80 mil dormentes com base na sugestão tanto da recicladora brasileira *Wisewood* quanto do instituto de pesquisa alemão *Fraunhofer ICT*. A janela do balanço dos *inputs* e *outputs* dos inventários e os ICVs completos calculados pelo GaBi *software* estão apresentados no Anexo 3 e 4, respectivamente, considerando os sistemas de produto e as suas fronteiras do sistema definidos no item 4.2.3.

5.2.1 ICV - Brasil

No Inventário do Ciclo de Vida do dormente de madeira natural foi considerada a sua queima no final do tempo de uso, uma vez que geralmente é a sua destinação final realizada no Brasil após o seu consumo. Entretanto, somente para fins de avaliação, após a apresentação dos resultados do ICV, também foram verificados os impactos nas emissões para o ar se a madeira natural fosse considerada uma matéria-prima carbono-neutro.

Já o dormente de madeira plástica, a expectativa no Brasil é que ele retorne para a indústria de reciclagem. Do mesmo modo que no caso da madeira natural, também foram verificados os impactos nas emissões atmosféricas quando a queima da madeira plástica é levada em conta. Essa última suposição foi feita para comparação de resultados.

A) Madeira Natural

Emissões do Inventário do Ciclo de Vida do dormente de madeira natural - considerando a sua queima no final do tempo de uso

Foi rodado o GaBi *software* considerando os dados e as fronteiras do sistema de todo o ciclo de vida dos dormentes de madeira natural definidos no Capítulo 4 (como ilustrado na Figura 17), que considera a queima da madeira natural ao final do seu uso como dormente). Assim, verificou-se que no caso brasileiro, a produção anual de 80 mil dormentes emite para atmosfera um total de massa de 122,81 mil toneladas ao longo de todo o ciclo de vida dos dormentes de madeira natural. Dentre elas, 122,78 mil toneladas são de emissões para o ar, 34 toneladas são para a água e praticamente nenhuma emissão para o solo (Figura 21).

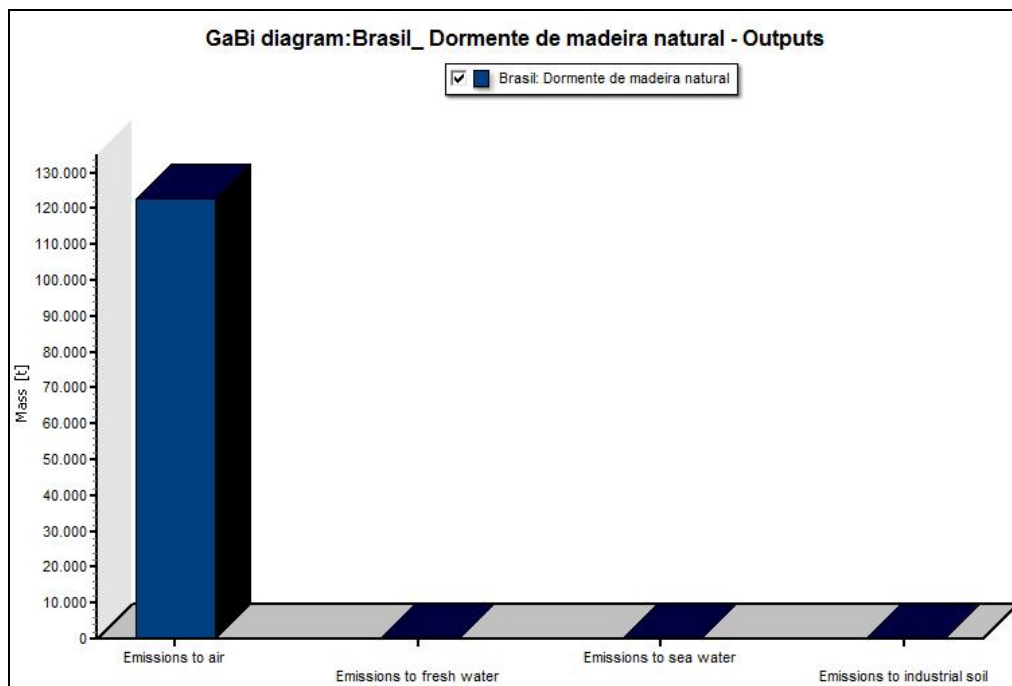


Figura 21 – Emissões totais (*outputs*) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Na Tabela 14 são apresentadas as emissões para o ar, para a água e para o solo ao longo de todo o ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira natural. Como a madeira é queimada em fornos domésticos e de olarias após o tempo de uso nas ferrovias, as maiores emissões ocorrem na última etapa (81%), ou seja, na sua reciclagem energética.

Tabela 14 – Emissões dos dormentes de madeira natural em cada etapa de seu ciclo de vida considerando a sua queima no final do tempo de uso – Brasil

	Floresta	Serraria	Indústria	Transporte	Queima	TOTAL
Emissões para o ar (t)	27	17.677	4.171	1.533	99.374	122.780
Emissões para a água (t)	0	5	1	19	8	34
Emissões para o solo (t)	0	0	0	0	0	0
TOTAL das emissões (t)	27	17.682	4.172	1.552	99.382	122.814
Participação de cada etapa na emissão total (%)	0,0	14,4	3,4	1,3	80,9	100

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Dentre as emissões para a atmosfera, as de maior peso correspondem as inorgânicas, devido ao dióxido de carbono (22,8 mil tCO₂) e ao vapor de água (5 mil t), e ao item “outras emissões” (95 mil t) (ver Figura 22).

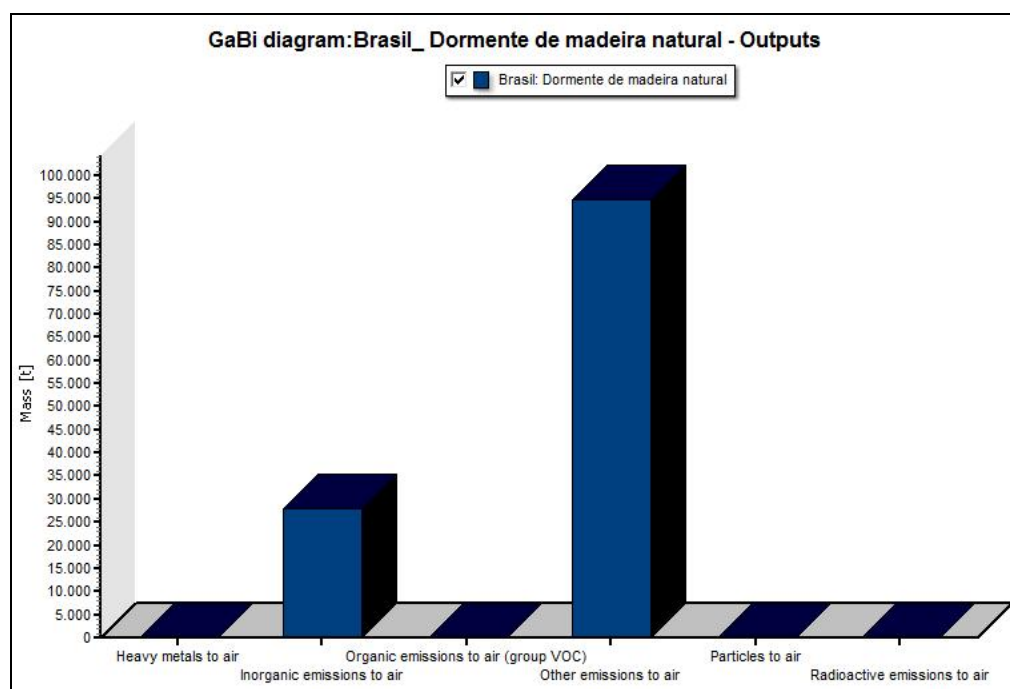


Figura 22 – Emissões para atmosfera (outputs) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Segundo a equipe de suporte do GaBi *software*, o item “outras emissões” foi criado para generalizar os gases que estão presentes na exaustão em todo o ciclo de vida do produto, desde a aquisição da matéria-prima até a sua disposição final, mas que não

foi possível definir ao certo a sua composição separadamente. Essas outras emissões não são classificadas em nenhuma categoria de impacto, como o potencial de acidificação e de efeito estufa, calculada no GaBi *software* (como será visto mais adiante no item 5.3). No entanto, podem causar outros impactos ambientais que não serão possíveis analisar nesta tese. Essa consideração será assumida em todos os ICVs desta tese.

Na Tabela 15 estão listadas as principais emissões para a atmosfera de cada dormente ferroviário de madeira natural no Brasil. Esse resultado mostra que mesmo o item “outras emissões” não bem definido pelo GaBi, não apresenta importância nas emissões de dióxido de carbono que promovem o efeito estufa.

Tabela 15 – Emissão por unidade de dormente de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	1.535
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	286
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	63
Outras (kg)	1.174

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Análise do impacto nas emissões do ICV do dormente de madeira natural - considerando a sua queima no final do tempo de uso, sendo a madeira C-neutro

Para avaliar o impacto da queima da madeira na emissão atmosférica, a madeira foi considerada uma matéria-prima carbono-neutro. Ou seja, não foram contabilizadas as emissões de carbono provenientes da queima da madeira no final da vida útil como dormente de ferrovia

Neste caso, as emissões totais ao longo de todo o ciclo de vida dos 80.000 dormentes ferroviários reduziram de 122,81 para 23,43 mil toneladas. Dentre essas emissões totais, 23,40 mil toneladas são emitidas para o ar, 26 toneladas para a água e praticamente nenhuma emissão para o solo.

Os itens mais relevantes nas emissões gasosas são o dióxido de carbono (8,1 mil tCO₂), o vapor de água (4,9 mil t) e as "outras emissões" (10,4 mil t).

Portanto, quando não se supõe a queima da madeira ao final do tempo de uso como dormente de ferrovia, as emissões de dióxido de carbono ao longo de todo o ciclo de vida são reduzidas em 185 kgCO₂, passando de 286 kgCO₂ para 101 kgCO₂. Também se observa uma forte redução das emissões totais, diminuindo de 1.535 kg para 293 kg, como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 - Emissão por unidade de dormente de madeira natural não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	293
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	101
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	61
Outras (kg)	130

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

B) Madeira Plástica

Emissões do Inventário do Ciclo de Vida do dormente de madeira plástica – não considerando a sua queima no final do tempo de uso

Como definido no Capítulo 4, é planejado pelas empresas de reciclagem brasileiras o retorno da madeira plástica para reciclagem após o seu tempo de uso como dormente de ferrovia (como ilustrado da Figura 18), por isso foi feita a análise mais detalhada dessas considerações.

A emissão total dos 80.000 dormentes de madeira plástica ao longo de todo o ciclo de vida é de 30,32 mil toneladas, sendo 30,30 mil toneladas de emissões para o ar, 17 toneladas para a água e zero tonelada de emissão para o solo, como pode ser visto na Figura 23.

No ciclo de vida dos dormentes de madeira plástica analisados no estudo, a maior parte das emissões ocorre na indústria de reciclagem (98%). Já o transporte dos materiais tem a menor participação nas emissões (0,5%) e a cooperativa (usina de triagem) é responsável por apenas 2% das emissões. Não estão sendo contabilizadas as emissões na disposição final uma vez que no Brasil espera-se que os dormentes retornarão para a indústria de reciclagem.

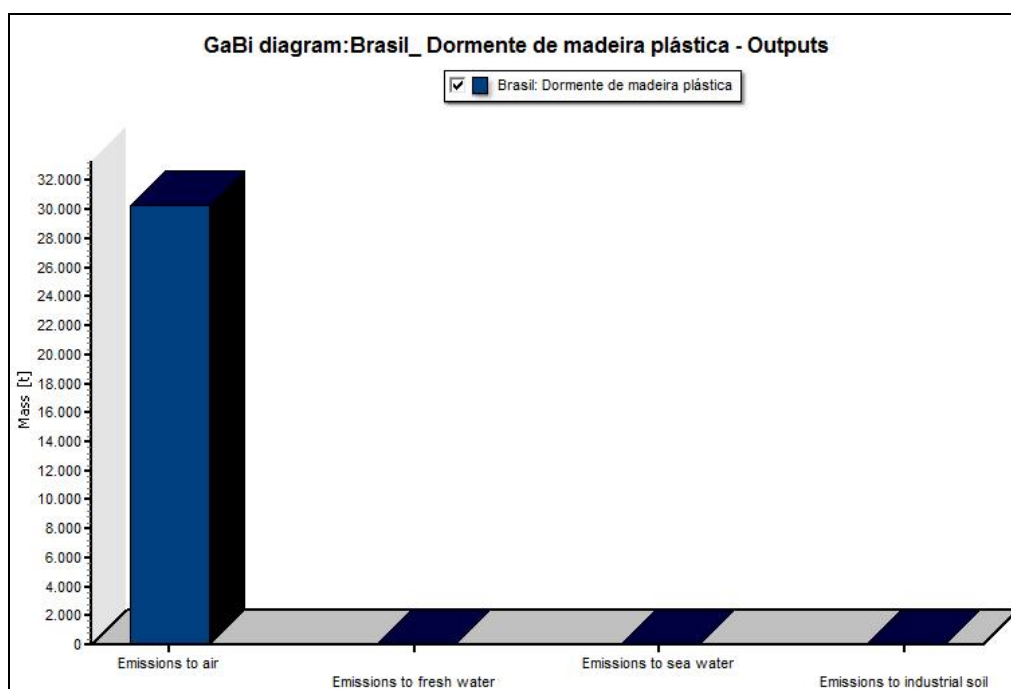


Figura 23 - Emissões totais (outputs) dos dormentes de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Na Tabela 17 são apresentadas as emissões para o ar, para a água e para o solo dos 80 mil dormentes de madeira plástica ao longo do ciclo de vida no Brasil.

Tabela 17 – Emissões dos dormentes de madeira plástica em cada etapa de seu ciclo de vida não considerando a sua queima no final do tempo de uso – Brasil

	Cooperativa	Indústria	Transporte	TOTAL
Emissões para o ar (t)	567	29.587	149	30.303
Emissões para a água (t)	0	15	2	17
Emissões para o solo (t)	0	0	0	0
TOTAL das emissões (t)	567	29.602	151	30.320
Participação de cada etapa na emissão total (%)	1,9	97,6	0,5	100

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

As emissões para a atmosfera são as mais significativas. A maior influência vem dos compostos “inorgânicos” e da categoria “outras emissões”. Dentre a emissão dos compostos “inorgânicos”, os itens mais relevantes são o dióxido de carbono (7,4 mil

tCO₂) e o vapor de água (5,3 mil t). O total das "outras emissões" é de 17,5 mil toneladas (ver Figura 24).

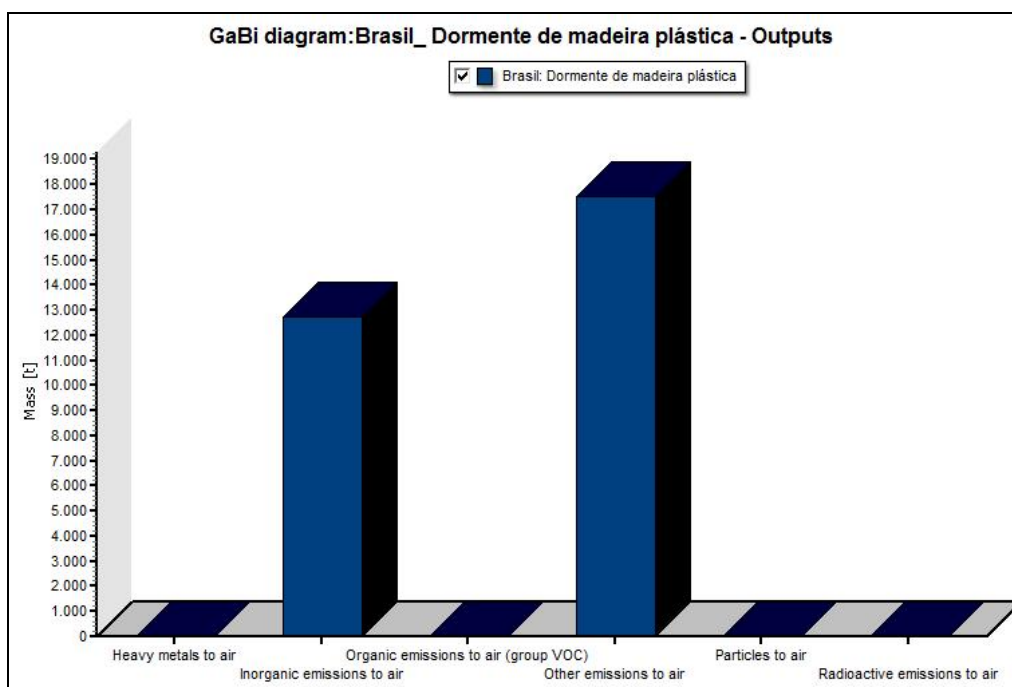


Figura 24 - Emissões para atmosfera (outputs) dos dormentes de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV do Brasil

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Sendo assim, como não estão sendo consideradas as emissões da queima da madeira plástica após o seu uso como dormente, as emissões totais para o ar ao longo de todo o seu ciclo de vida são 1.156 kg menores do que as apresentadas para cada dormente de madeira natural (1.535 kg), como apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Emissão por unidade de dormente de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	379
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	92
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	67
Outras (kg)	219

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Análise do impacto nas emissões do ICV do dormente de madeira plástica - considerando a sua queima no final do tempo de uso

Somente para fins de avaliação, verificou-se o impacto nas emissões atmosféricas se a madeira plástica fosse destinada para a usina de incineração com recuperação energética no final do tempo de uso como dormente de ferrovia, conforme mostrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Emissão por unidade de dormente de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso - Brasil

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	2.544
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	373
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	80
Outras (kg)	2.090

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A partir dessa análise, observa-se um aumento de 2.165 kg das emissões totais para o ar e de 281 kg de dióxido de carbono por cada unidade de dormente. Neste caso, as emissões atmosféricas da produção dos 80 mil dormentes aumentariam 174 mil tCO₂, passando de 30 mil tCO₂ para 204 mil tCO₂.

5.2.2 ICV - Alemanha

Assim como no ICV do dormente de madeira natural no caso brasileiro, a madeira natural é queimada na Alemanha para geração de energia após o seu uso como dormente de ferrovia. Também foram verificados os impactos nas emissões para o ar quando a madeira natural é considerada uma matéria-prima carbono-neutro, que são apresentados logo após os resultados do ICV.

Já no caso dos dormentes de madeira plástica, ao contrário do esperado no Brasil, a expectativa na Alemanha é que os dormentes sejam destinados para as usinas de incineração com recuperação de energia no final do tempo de uso nas ferrovias. Sendo assim, após a apresentação dos resultados do ICV, são analisados os impactos nas emissões para o ar quando se considera a queima da madeira plástica no final do ciclo de vida.

A) Madeira Natural

Emissões do Inventário do Ciclo de Vida do dormente de madeira natural - considerando a sua queima no final do tempo de uso

Os resultados observados nesse item foram calculados com base na fronteira do sistema definido no Capítulo 4 (como na Figura 19).

Considerando a produção anual de 80.000 unidades, as emissões totais ao longo de todo o ciclo de vida dos dormentes são de 167,9 mil toneladas, sendo 167,8 mil toneladas de emissões para o ar, 139 toneladas para a água e praticamente nenhuma emissão para o solo, como pode ser visto na Figura 25.

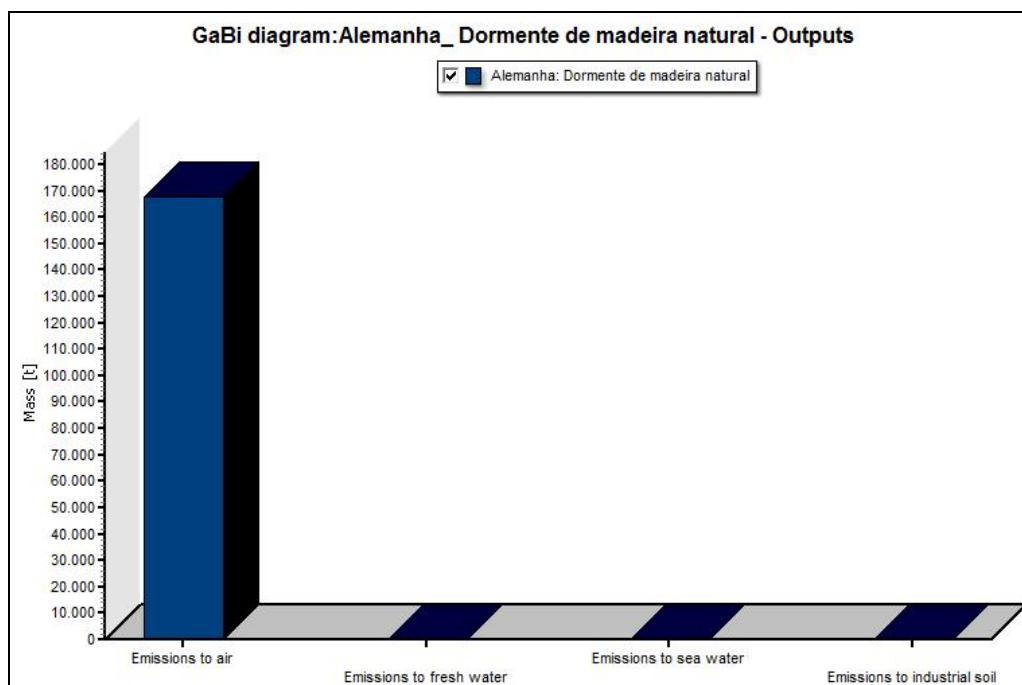


Figura 25 – Emissões totais (*outputs*) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Ao longo do ciclo de vida dos dormentes ferroviários produzidos com madeira natural, 55% das emissões para o ar ocorrem na sua incineração com recuperação de energia ou última etapa. Na Alemanha, a madeira que está impregnada com creosoto (que também serve como combustível) é queimada em incineradores para produzir energia, ao final do tempo de uso como dormente de ferrovia. A serraria é a segunda maior responsável pelas emissões totais do dormente de madeira natural.

Na Tabela 20 são apresentadas as emissões para o ar, para a água e para o solo dos 80 mil dormentes de madeira natural ao longo do ciclo de vida.

Tabela 20 – Emissões dos dormentes de madeira natural em cada etapa do ciclo de vida considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha

	Floresta	Serraria	Impregnação	Transporte	Queima - creosoto	Queima - madeira	TOTAL
Emissões para o ar (t)	41	71.517	1.253	1.261	753	92.957	167.781
Emissões para a água (t)	0	113	5	16	0	6	139
Emissões para o solo (t)	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL das emissões (t)	41	71.630	1.258	1.276	753	92.963	167.921
Participação de cada etapa na emissão total (%)	0,0	42,7	0,7	0,8	0,4	55,4	100

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

As emissões para a atmosfera são, portanto, as mais significativas. A maior influência vem das emissões gasosas de compostos inorgânicos e da categoria "outras emissões". Dentre as emissões dos compostos orgânicos a maior influência vem do dióxido de carbono (24,88 mil tCO₂) e de vapor de água (25,10 mil t) e o total das "outras emissões" é de 118 mil toneladas (ver Figura 26).

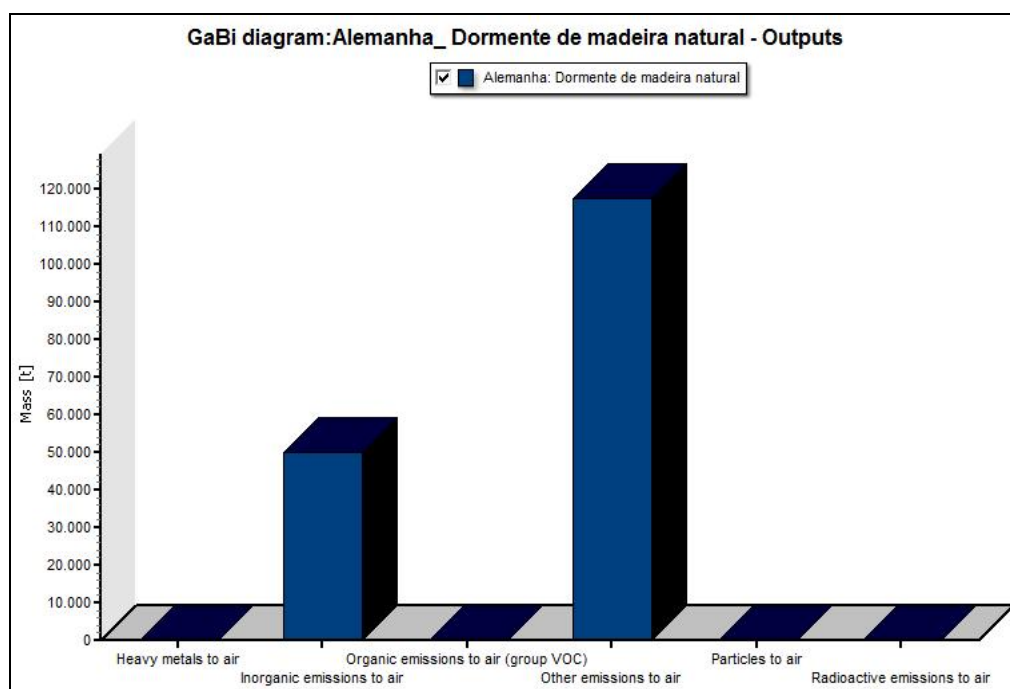


Figura 26 – Emissões para atmosfera (*outputs*) dos dormentes de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha
Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Sendo assim, cada dormente ferroviário de madeira natural fabricado na Alemanha emite para atmosfera um total de 2.086 kg (ver Tabela 21), apresentando uma emissão maior, de 551 kg, para o mesmo caso no Brasil.

Tabela 21 – Emissão por unidade de dormente de madeira natural considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	2.086
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	310
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	310
Outras (kg)	1.455

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Análise do impacto nas emissões do ICV do dormente de madeira natural - considerando a sua queima no final do tempo de uso, sendo a madeira C-neutro

Como a madeira na Alemanha é extraída da floresta plantada, poderia argumentar-se que a madeira natural deveria ser considerada como uma matéria-prima carbono-

neutro. Neste caso, as emissões totais ao longo de todo o ciclo de vida dos 80.000 dormentes ferroviários são de 75 mil toneladas, sendo 74,8 mil toneladas de emissões para o ar, 134 toneladas para a água e praticamente nenhuma emissão para o solo.

A maior influência das emissões para atmosfera vem dos inorgânicos e de "outras emissões". A emissão dos "inorgânicos" é influenciada pelo dióxido de carbono (11 mil tCO₂) e pelo vapor de água (25 mil t) e o total das "outras emissões" é de 39 mil toneladas.

As emissões de cada dormente ferroviário de madeira natural, quando a sua queima não é contabilizada no Inventário do Ciclo de Vida, estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Emissão por unidade de dormente de madeira natural não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	935
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	138
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	311
Outras (kg)	485

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A partir da verificação do impacto nas emissões quando se considera a madeira uma matéria-prima carbono neutro, se observa uma redução de 45% das emissões atmosféricas totais, passando de 2.086 kg para 935 kg. As emissões de dióxido de carbono diminuem nessa mesma proporção, reduzindo de 310 kgCO₂ para 138 kgCO₂.

B) Madeira Plástica

Emissões do Inventário do Ciclo de Vida do dormente de madeira plástica - considerando a sua queima no final do tempo de uso

Como definido no Capítulo 4, espera-se que na Alemanha a madeira plástica seja queimada em incineradores de resíduos sólidos urbanos para geração de energia (como detalhado na Figura 20), por isso foi feita uma análise mais detalhada assumindo essa consideração.

Sendo assim, a produção anual de 80.000 dormentes de ferrovia de madeira plástica emite, ao longo de todo o seu ciclo de vida, um total de 281,8 mil toneladas, sendo 281,6 mil toneladas de emissões para o ar, 138 toneladas para a água e praticamente nenhuma emissão industrial para o solo, como pode ser visto na Figura 27.

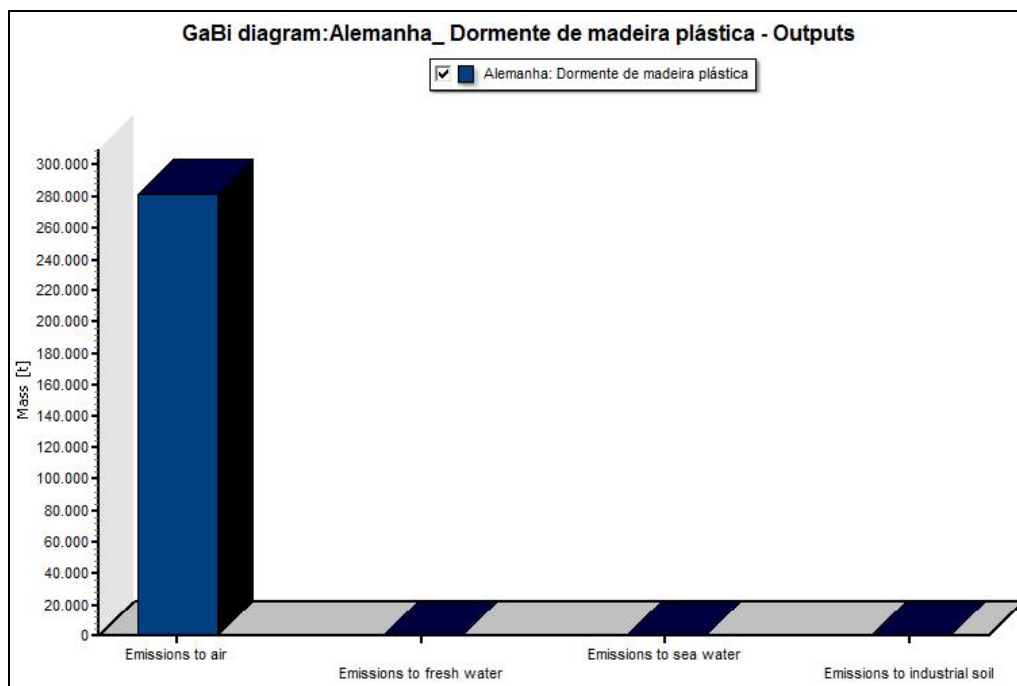


Figura 27 - Emissões totais (*outputs*) dos dormentes de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

No ciclo de vida dos dormentes fabricados a partir de plásticos reciclados, nota-se que a disposição final em usinas de incineração é responsável por 73% das emissões totais. A indústria de reciclagem contribui com 20% e a planta de triagem com apenas 6%.

Na Tabela 23 são apresentadas as emissões para o ar, para a água e para o solo dos 80 mil dormentes de madeira plástica ao longo do ciclo de vida.

Tabela 23 – Emissões dos dormentes de madeira plástica em cada etapa do ciclo de vida considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha

	Triagem	Indústria	Transporte	Queima	TOTAL
Emissões para o ar (t)	18.148	57.220	38	206.256	281.663
Emissões para a água (t)	30	90	0	17	138
Emissões para o solo (t)	0	0	0	0	0
TOTAL das emissões (t)	18.148	57.220	38	206.256	281.663
Participação de cada etapa na emissão total (%)	6,4	20,3	0,0	73,2	100

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

As emissões para a atmosfera são, portanto, as mais significativas. A maior influência vem das emissões gasosas dos compostos inorgânicos e da categoria “outras emissões”. Dentre as emissões dos compostos inorgânicos a maior influência vem do dióxido de carbono (36,22 mil tCO₂) e de vapor de água (27,06 mil t) e o total das “outras emissões” é de 217 mil toneladas (ver Figura 28).

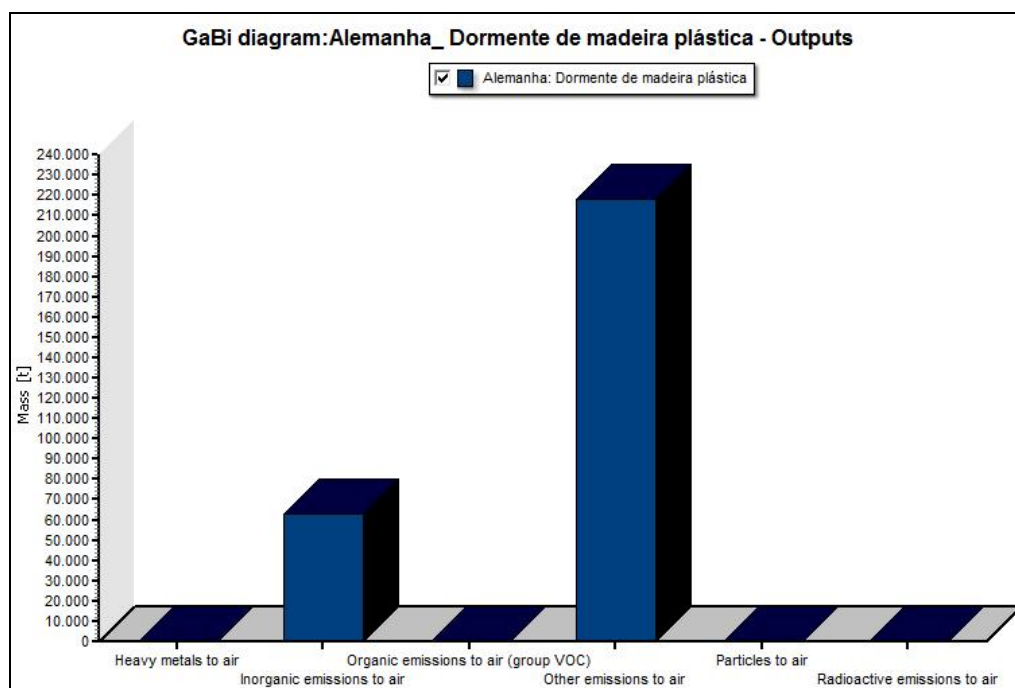


Figura 28 - Emissões para atmosfera (outputs) dos dormentes de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso no ICV da Alemanha

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Portanto, cada dormente ferroviário de madeira plástica emite para atmosfera um total de 3.521 kg, sendo 453 kg de dióxido de carbono, ao longo do ciclo de vida como pode ser visto na Tabela 24. Essas emissões são maiores que no caso brasileiro, mesmo quando da consideração da queima da madeira plástica no final do seu tempo de uso.

Tabela 24 – Emissão por unidade de dormente de madeira plástica considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	3.521
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	453
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	338
Outras (kg)	2.715

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Análise do impacto nas emissões do ICV do dormente de madeira plástica - não considerando a sua queima no final do tempo de uso

Somente para fins de avaliação, foram verificadas as emissões para o ar quando não considerada a queima do dormente de madeira plástica ao final da sua via útil (ver Tabela 25). Sendo, então, destinado a um aterro sanitário ou retornado para a indústria de reciclagem.

Tabela 25 - Emissão por unidade de dormente de madeira plástica não considerando a sua queima no final do tempo de uso - Alemanha

Tipo de emissão	Quantidade
Totais para o ar (kg)	943
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	119
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	322
Outras (kg)	501

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Contudo, quando da não consideração da queima da madeira plástica ao final do seu uso como dormente de ferrovia, se observa uma redução das emissões totais de 2.578 kg e do dióxido de carbono de 334 kgCO₂.

5.2.3 ICV Brasil e Alemanha – Unidade funcional

Uma vez concluída a elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes no Brasil e na Alemanha, verificou-se os resultados observados considerando a unidade funcional definida no estudo. Como previamente definido no item 4.2.4, a unidade funcional contabiliza um quilômetro de estrada de ferro com dormentes de madeira natural ou com dormentes de madeira plástica e a vida útil dos dormentes. Em cada quilômetro são instalados 1.852 dormentes e a vida útil dos dormentes de madeira natural é de 20 anos (no Brasil) e de 30 anos (na Alemanha) e dos dormentes de madeira plástica é de 50 anos nos dois países.

Na Tabela 26 pode ser visto que no Brasil, cada quilômetro de ferrovia de madeira natural emite um total para o ar de 7.107 t, enquanto que o dormente de madeira plástica emite 702 t.

Tabela 26 - Emissão por quilômetro de ferrovia considerando a vida útil dos dormentes - Brasil

Tipo de emissão	Madeira natural	Madeira plástica	Diferença
Totais para o ar (t)	7.107	702	6.405
Inorgânica referente ao CO ₂ (t)	1.324	170	1.154
Inorgânica referente ao vapor de água (t)	292	124	168
Outras (t)	5.436	406	5.030

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A coluna de diferença representa os valores das emissões do dormente de madeira natural menos os valores das emissões do dormente de madeira plástica.

Na Tabela 27Tabela 26 pode ser visto que na Alemanha, cada quilômetro de ferrovia de madeira natural emite um total para o ar de 6.439 t, enquanto que o dormente de madeira plástica emite 6.521 t.

Tabela 27 - Emissão por quilômetro de ferrovia considerando a vida útil dos dormentes - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira natural	Madeira plástica	Diferença
Totais para o ar (t)	6.439	6.521	-82
Inorgânica referente ao CO ₂ (t)	957	839	118
Inorgânica referente ao vapor de água (t)	957	626	331
Outras (t)	4.491	5.028	-537

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

5.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida dos dormentes - Fase 3

Nesta terceira etapa foi realizada a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha a partir dos ICV elaborados para cada um dos casos, utilizando o *software* de ACV. O GaBi oferece uma opção que agrupa os dados de *output* (emissões para o ar, a água e o solo) em categorias de impacto ambiental, definidas para este estudo específico com base na literatura especializada, conforme apresentado no item 4.2.7.

Uma vez feito isso, foram verificadas dentre as 10 categorias de impacto ambiental analisadas no estudo as mais significativas, a fim de possibilitar uma interpretação mais detalhada dos dados de *outputs* do ICV dos dormentes nos dois países.

5.3.1 AICV - Brasil

Neste item cada parâmetro de *output* do ICV foi associado a uma das categorias de impacto. Lembrando que um mesmo parâmetro pode ser associado a mais de uma categoria.

Na Tabela 28 são apresentadas as 10 categorias de impacto ambiental analisadas no estudo e seus impactos nos Inventários do Ciclo de Vida elaborados para os 80 mil dormentes de madeira natural - considerando a sua queima no final do tempo de uso -, e de madeira plástica - não considerando a sua queima no final do tempo de uso.

**Tabela 28 – Valoração das categorias de impacto ambiental para cada dormente -
Brasil**

	Madeira natural	Madeira plástica
Potencial de Eutrofização [kg Fósforo e]	0	0
Potencial de Ecotoxicidade Aquática [kg DCBe]	0	0
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre [kg DCBe]	0	0
Metais pesados [kg Pbe]	0	0
Potencial de Depleção do Ozônio [kg R11e]	0	0
Potencial de Acidificação [kg SO ₂ e]	0	0
Substâncias cancerígenas [kg PAHe]	0	0
Potencial de Toxicidade Humana [kg DCBe]	8	6
Radiação Ionizante [Bq I129e]	22	19
Aquecimento Global (100 anos) [kg CO ₂ e]	289	96

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A partir da AICV foi possível verificar uma maior influência de três dessas categorias:

(i) Potencial de toxicidade humana; (ii) Radiação ionizante; e (iii) Aquecimento global.

Dentre as categorias, observou-se que o “Potencial de toxicidade humana” é influenciado pelos elementos químicos níquel, vanádio, arsênio, benzeno, óxido nítrico e selênio, emitidos basicamente na geração de energia elétrica. No entanto, esses elementos foram apenas identificados no GaBi, não foi feita nesta tese nenhuma análise mais detalhada de seus impactos no meio ambiente.

A “Radiação ionizante” também ocorre devido às emissões oriundas da geração de energia elétrica. Tanto na produção de dormentes de madeira natural quanto de madeira plástica esse indicador é influenciado por 90% das emissões do carbono-14 (C14 ou radiocarbono). Segundo a equipe de suporte do GaBi *software* a emissão do carbono-14 ocorre durante o processo de geração de energia nas usinas nucleares.

A categoria “Aquecimento global” apresentou influência principalmente pela emissão de dióxido de carbono (97% - também para ambos os casos) durante todo o ciclo de vida.

Como o objetivo da tese é analisar as emissões de gases de efeito estufa, o foco deste estudo foi dado à categoria “Aquecimento Global”. A Plataforma Européia sobre Avaliação do Ciclo de Vida (em inglês *European Platform on Life Cycle Assessment*), da Comunidade Européia, define a pegada de carbono como um subconjunto do

estudo de ACV e, no atual contexto político, este indicador é um dos mais utilizados no processo decisório relativo ao consumo e produção sustentáveis (EU, 2007).

Os gases de efeito estufa são expressos em termos de massa de CO₂e, usando para isso o “Potencial de Aquecimento Global” (em inglês *Global Warming Potential - GWP*). Essa medida compara os GEE usando um equivalente funcional definindo como referência o dióxido de carbono (igual a 1). Ou seja, o GWP compara o forçamento radioativo de 1 tonelada de um determinado gás de efeito estufa durante um determinado período (por exemplo, de 100 anos) com uma tonelada de dióxido de carbono. O forçamento radioativo é uma etapa do cálculo da elevação da temperatura global da camada da atmosfera junto à superfície da Terra, mas ele não representa diretamente esse aumento de temperatura. A sua definição pode ser encontrada no relatório *2007 IPCC Fourth Assessment Report - Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) órgão das Nações Unidas. Nesse relatório também são fornecidos os valores *default* para cada um dos gases de efeito estufa, determinados como relevantes pelo IPCC (como o dióxido de carbono - CO₂, metano - CH₄, óxido nitroso - N₂O e hidrocloroflúor carbonos - HFCs) (IPCC, 2007).

O GaBi disponibiliza uma série de metodologias que calcula a categoria de impacto “Aquecimento global”. Para este estudo foi escolhido o indicador *CML-96 Global Warming Potential (100 years) [kgCO₂e]*, calculado pelo Instituto de Ciência Ambiental (em inglês *Institute of Environmental Sciences – CML*) da Universidade de Leiden, na Holanda, com base na metodologia desenvolvida pelo IPCC (GABI, 2009).

5.3.2 AICV - Alemanha

Na Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida dos dormentes na Alemanha, foram assumidas as mesmas considerações e formato de apresentação das categorias no caso brasileiro.

Na Tabela 29 são listadas as 10 categorias de impacto ambiental e suas influências ao longo do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira natural e de madeira plástica, considerando a queima de ambas os materiais no final da vida útil como dormente de ferrovia.

Tabela 29 – Valoração das categorias de impacto ambiental para cada dormente – Alemanha

	Madeira natural	Madeira plástica
Potencial de Eutrofização [kg Fósforo e]	0	0
Potencial de Ecotoxicidade Aquática [kg DCBe]	0	0
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre [kg DCBe]	0	0
Metais pesados [kg Pbe]	0	0
Potencial de Depleção do Ozônio [kg R11e]	0	0
Potencial de Acidificação [kg SO ₂ e]	0	0
Substâncias cancerígenas [kg PAHe]	1,7	0
Potencial de Toxicidade Humana [kg DCBe]	4	9
Radiação Ionizante [Bq I129e]	166	178
Aquecimento Global (100 anos) [kg CO ₂ e]	321	469

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A partir da AICV dos dormentes observou-se a maior influência das mesmas três categorias do caso brasileiro: (i) Potencial de toxicidade humana; (ii) Radiação ionizante; e (iii) Aquecimento global. No entanto, verificou-se também que apenas a madeira natural impregnada apresentou uma emissão de substâncias cancerígenas.

De acordo com a classificação feita pelo GaBi, a categoria de impacto “Potencial de toxicidade humana” é influenciada pelos elementos químicos antimônio, arsênio, selênio, fluoreto de hidrogênio e óxido nítrico provindos basicamente das emissões da queima do plástico e do uso de energia elétrica da rede alemã. Assim como no caso da AICV do Brasil, não foi feita nesta tese nenhuma análise mais detalhada dos impactos desses elementos para o meio ambiente.

A categoria “Radiação ionizante” ocorre devido às emissões oriundas da geração de energia elétrica na Alemanha. Tanto na produção de dormentes de madeira quanto de plástico esse indicador é influenciado por 90% das emissões do carbono-14 (ou radiocarbono). Assim como no Brasil, essa emissão ocorre durante o processo de geração de energia nas usinas nucleares.

A categoria “Aquecimento global” é influenciada principalmente pela emissão de dióxido de carbono (97% - também para ambos os casos) durante todo o ciclo de vida dos dormentes.

As emissões de substâncias cancerígenas podem ser atribuídas basicamente ao tratamento de creosoto dado à madeira natural.

Assim como mencionado no caso brasileiro, no estudo foi dada ênfase as emissões que promovem aumento do efeito estufa. Como visto na apresentação dos Inventários do Ciclo de Vida, os itens mais relevantes nas emissões gasosas são as emissões inorgânicas, influenciadas pelo dióxido de carbono e vapor de água, e as "outras emissões". No entanto, esse último não é especificado no GaBi e não influencia a categoria "Aquecimento Global", inviabilizando, assim, uma análise mais detalhada do seu impacto no meio ambiente.

Contudo, por falta de dados sobre o item "outras emissões" o estudo do impacto ambiental será parcial e direcionado apenas para a categoria "Aquecimento global".

5.3.3 Análise comparativa das emissões de GEE dos ICVs

Uma vez identificado o impacto da categoria "Aquecimento global", foi realizada uma análise comparativa das emissões de GEE em cada unidade de processo do ICV da produção dos 80 mil dormentes de madeira natural e de madeira plástica, no Brasil e na Alemanha, de acordo com os sistemas de produto e as suas fronteiras do sistema determinados no item 4.2.3.

A) Madeira Natural

A análise comparativa das emissões de gases de efeito estufa em cada etapa do ICV da produção dos 80 mil dormentes de madeira natural no Brasil e na Alemanha apresentou um resultado bem próximo entre os dois países, como pode ser verificado na Tabela 30. A linha de diferença mede as emissões brasileiras menos as alemãs em cada etapa do ICV.

Tabela 30 – Emissão de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira natural no Brasil e na Alemanha (tCO₂e)

	Floresta	Serraria	Impregnação	Transporte	Queima - creosoto	Queima - madeira	TOTAL
Brasil	23	6.739	0	1.431	0	14.965	23.159
Alemanha	36	9.460	198	1.178	725	14.008	25.604
Diferença	-13	-2.721	-198	253	-725	957	-2.445

Fonte: Elaboração própria

A coluna de diferença representa os valores das emissões no Brasil menos as emissões na Alemanha.

Na tabela acima, a coluna “serraria” representa para o Brasil a soma das emissões provenientes da serraria, que corta a tora em madeira serrada, e da indústria de transformação, que transforma a madeira serrada em dormente de ferrovia. Na Alemanha, essas duas etapas ocorrem no mesmo local.

A diferença de 2.445 tCO₂e entre o total das emissões de gases de efeito estufa do dormente de madeira natural pode ser explicada, principalmente, pelo maior consumo de combustível nas serrarias alemãs. Nas visitas realizadas as usinas de triagem, observou-se o uso de mais maquinário nas serrarias na Alemanha do que no Brasil.

Na primeira etapa (floresta), a Alemanha apresentou uma maior emissão devido à necessidade do maior número de árvores cortadas do que no Brasil. Segundo as informações obtidas nas visitas e entrevistas as empresas, como detalhado no Capítulo 4, a partir do cerne das árvores cortadas na Floresta Amazônica, é possível fabricar de dois a três dormentes retangulares de quatro faces (no trabalho assumiu-se três dormentes) e nas florestas alemãs, dois dormentes.

Na etapa de transporte, estão sendo consideradas todas as emissões provenientes dos transportes de materiais ocorridos com caminhão ao longo do ciclo de vida. A maior emissão foi verificada no transporte da madeira serrada na serraria brasileira, normalmente localizada próxima ao local aonde a madeira foi cortada na Floresta Amazônica, para a indústria de transformação dos dormentes, instaladas geralmente na região sudeste do Brasil.

Na última etapa do ciclo de vida dos dormentes de madeira natural, verificou-se uma maior emissão de GEE da sua queima no Brasil. Isso porque o peso assumido no estudo para cada dormente de madeira natural brasileiro foi de 86 kg, enquanto que no caso alemão foi de 80 kg.

As unidades de processo que mais contribuem para a emissão de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos dormentes de madeira natural no Brasil são a serraria (29%) e a incineração da madeira ao final da sua vida útil (65%). Na Alemanha ocorre o mesmo, mas a contribuição da serraria é maior que no caso brasileiro (37%) e da queima da madeira menor (55%). O percentual de cada etapa no total das emissões de cada país está ilustrado na Figura 29.

B) Madeira Plástica

Na análise comparativa das emissões de gases de efeito estufa em cada unidade de processo dos Inventários do Ciclo de Vida dos 80 mil dormentes da madeira plástica no Brasil e na Alemanha apresenta uma diferença maior que no caso do dormente de madeira natural, de quase 30 mil toneladas de gases de efeito estufa. Isso porque no Inventário do Ciclo de Vida dos dormentes de madeira plástica no Brasil está sendo considerado o retorno dos dormentes para a indústria de reciclagem.

Na Tabela 31, pode ser visto que essa diferença, fora a queima da madeira plástica ao final do ciclo de vida, se deve também as maiores emissões de GEE nas usinas de triagem (2.236 tCO₂e) alemãs.

Como apresentado no Capítulo 3, nas visitas às empresas e nas respostas aos questionários, verificou-se um sistema muito mais mecanizado nas usinas de triagem alemãs do que nas brasileiras. Na Alemanha existem nessas unidades diversas tecnologias para separar os materiais nas usinas de triagem, tais como uso de peneiras rotativas, separação magnética e raios infravermelhos. Esse maior maquinário exige um maior consumo de energia elétrica da usina e que, conseqüentemente, aumentam as emissões de gases de efeito estufa dessa etapa.

Tabela 31 – Emissão de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira plástica no Brasil e na Alemanha (tCO₂e)

	Triagem / Cooperativa	Indústria de reciclagem	Transporte	Queima	TOTAL
Brasil	175	7.327	139	0	7.641
Alemanha	2.411	7.569	36	27.423	37.438
Diferença	-2.236	-242	103	-27.423	-29.797

Fonte: Elaboração própria

No entanto, caso fossem consideradas no ICV do Brasil as emissões de gases de efeito estufa provenientes da queima em incineradores (com recuperação de energia) dos dormentes de madeira plástica (23 mil tCO₂e), o total das emissões aumentariam de 7.641 tCO₂e para tCO₂e 30.601 tCO₂e.

Na Figura 30 nota-se que a indústria de reciclagem é responsável por 96% das emissões de gases de efeito estufa no ICV dos dormentes produzidos no Brasil. No

caso da Alemanha, pode ser observado que a queima do plástico ao final da sua vida útil é a unidade de processo que mais contribuem para a emissão de GEE ao longo do ciclo de vida dos dormentes de madeira plástica (73%), seguido da indústria de reciclagem (20%).

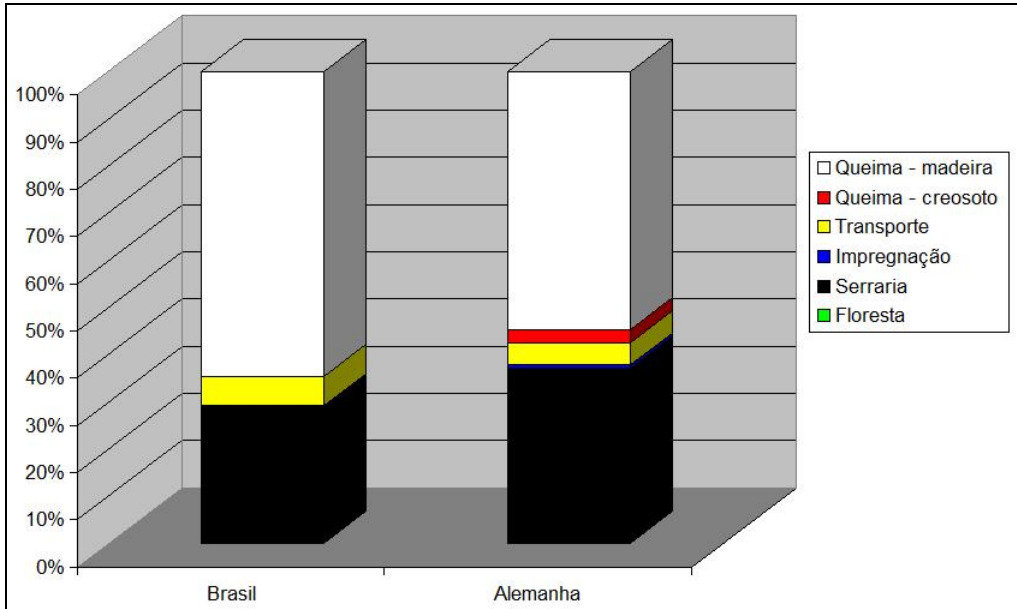


Figura 29 – Contribuição das emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira natural no Brasil e na Alemanha

Fonte: Elaboração própria

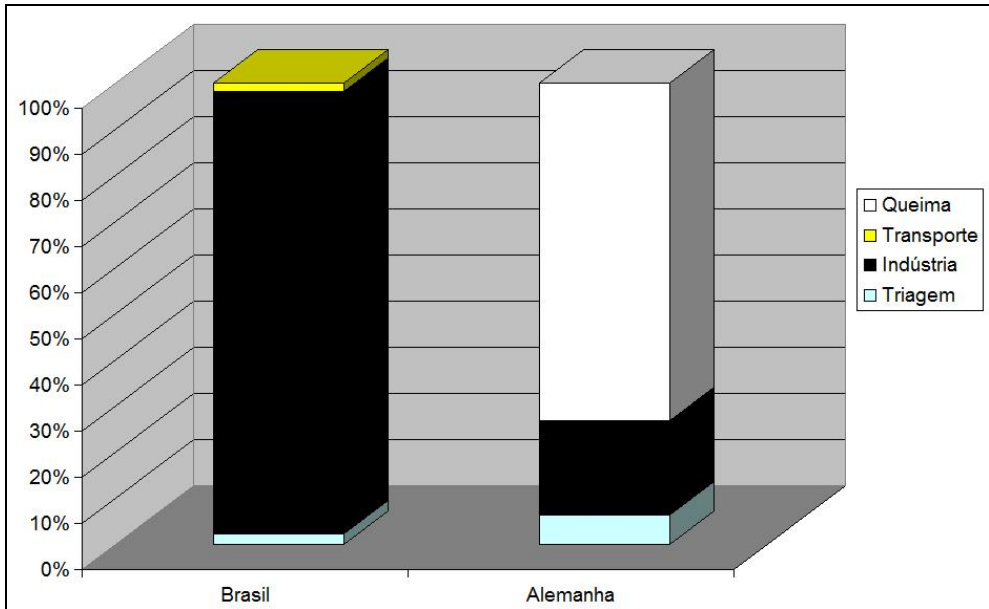


Figura 30 – Contribuição das emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida dos 80 mil dormentes de madeira plástica no Brasil e na Alemanha

Fonte: Elaboração própria

5.4 Interpretação do Ciclo de Vida dos dormentes - Fase 4

A Fase 4 da Avaliação do Ciclo de Vida consiste na interpretação dos resultados obtidos na elaboração do ICV (Fase 2) e da AICV (Fase 3) de acordo com os objetivos e escopo previamente definidos na Fase 1. Nesta fase, ainda pode ser feita uma análise variando um ou mais parâmetros do ciclo de vida estudado, como a construção de cenários com caso mais pessimista e mais otimista. Assim, chegam-se as conclusões e recomendações.

Sendo assim, nesta ultima fase da ACV foi realizada a Análise de Cenários, comparando uma unidade de dormente de madeira natural com uma de madeira plástica. Foram, então, elaborados 24 cenários (12 para o Brasil e 12 para a Alemanha) utilizando o ICV de cada dormente, dando ênfase às emissões totais atmosféricas, de três itens (dióxido de carbono, vapor de água e outras emissões) e de gases de efeito estufa. Nesses cenários foram verificadas essas emissões provenientes da queima dos dormentes no final do tempo de uso para geração de energia elétrica e a sua disposição final em aterros sanitários. Ou seja, foram observados os impactos a partir das diferentes fronteiras do sistema assumidas neste estudo. Além disso, foi analisada a influência nas emissões quando se considera o tempo de vida útil de cada dormente.

Posteriormente, foi observado o impacto nas emissões de dióxido de carbono equivalente quando se considera o tempo de vida útil dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica em ambos os países.

Por fim, são apresentadas algumas considerações da Avaliação do Ciclo de Vida dos dormentes de ferrovia no Brasil e na Alemanha. A partir da Análise de Cenários é possível verificar os parâmetros relevantes e seus impactos nas emissões dos Inventários do Ciclo de Vida, fornecendo, assim, informações para o público-alvo do estudo.

Apenas lembrando que, para fins de simplificação dos títulos, a madeira natural é chamada de “madeira” e a madeira plástica de “plástico”. Além disso, toda referência à queima ou à disposição final (aterro) dos materiais deve ser entendida como realizada após o término da sua vida útil como dormentes de ferrovia.

5.4.1 Análise de Cenários - Brasil

No Brasil o mercado de dormente de madeira natural está estabelecido há mais de 150 anos. Já o de madeira plástica, encontra-se muito incipiente, embora, exista diversas pesquisas em andamento, assim como testes e monitoramentos, em ferrovias brasileiras. De acordo com o levantamento dos dados, apresentados na revisão bibliográfica, apesar de existir um planejamento pelas recicladoras de reciclar os dormentes após a sua vida útil, foram construídos 12 cenários com diferentes considerações, a fim de avaliar outros possíveis cenários, mesmo com menos possibilidade de ocorrência.

Como o Brasil possui um inventário da geração e da distribuição da energia elétrica (COLTRO *et al.*, 2003) também foram verificadas na Análise de Cenários do Brasil as emissões de gases de efeito estufa quando da consideração desse inventário. No entanto, nas conclusões são abordados os resultados que consideram o ICV de geração de energia elétrica disponibilizado pela *PE International* no *GaBi databases 2006* (GABIE, 2009).

Cenário 1 – Considerando a queima da madeira e não do plástico

Com base nos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes, se considera apenas a queima da madeira natural após o tempo de uso como dormente de ferrovia e que os dormentes de madeira plástica retornariam para a indústria de reciclagem para confecção de novos dormentes. Este primeiro cenário estaria mais próximo da realidade brasileira.

Sendo assim, o valor das emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida de cada dormente de madeira natural, quando as emissões de carbono provenientes da sua queima são consideradas, é de 289 kgCO₂e. As emissões do dormente de madeira plástica, sem considerar a sua queima, são de 96 kgCO₂e. Isso representa uma emissão evitada de 194 kgCO₂e para cada dormente de madeira plástica instalado no lugar de um feito com madeira natural, como pode ser verificado na Tabela 32.

A coluna de diferença apresentada em todas as tabelas da análise de cenários representa os valores das emissões do dormente de madeira natural menos os valores das emissões do dormente de madeira plástica.

Tabela 32 – Cenário 1: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	1.535	379	1.156
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	286	92	193
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	63	67	-3
Outras (kg)	1.174	219	955
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	289	96	194
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	235	49	186

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 2 – Considerando a queima da madeira e não do plástico, sendo a madeira C-neutro

Quando a madeira é extraída de uma floresta plantada, seria razoável anular as emissões de carbono provenientes da sua queima ao final do seu tempo de uso, uma vez que a quantidade emitida de carbono é praticamente a mesma que absorvida ao longo do crescimento da árvore. Mesmo que no ICV do dormente no Brasil esteja sendo considerado o corte da madeira na Floresta Amazônica, esta suposição também será avaliada na Análise de Cenário no estudo brasileiro.

Sendo assim, neste cenário, verifica-se o impacto nas emissões quando a madeira natural é considerada uma matéria-prima carbono-neutro. Essa suposição anula as emissões de carbono oriundas da queima da madeira natural nos fornos domésticos e de olarias ao final da sua vida útil. Neste caso, as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida de cada dormente de madeira natural são reduzidas de 289 para 102 kgCO₂e e as emissões evitadas são de apenas 7 kgCO₂e quando um dormente de madeira natural é substituído por um de madeira plástica, como apresentado na Tabela 33.

Por outro lado, as emissões totais para o ar do dormente de madeira natural são menores que as apresentadas para o dormente de madeira plástica devido principalmente pelo item “outras emissões”. Apesar desse item não ser detalhado no estudo, como mencionado anteriormente, ele será apresentado em todas as tabelas comparativas a fim de mostrar a sua relevância nos resultados dos ICVs dos dormentes.

Tabela 33 – Cenário 2: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira natural e não do plástico, sendo a madeira C-neutro - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	293	379	-86
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	101	92	9
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	61	67	-6
Outras (kg)	130	219	-89
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	102	96	7
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	48	49	-1

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 3 – Considerando a queima da madeira e do plástico

No entanto, se no futuro os dormentes de madeira plástica fossem queimados em incineradores para produção de energia ao final da vida útil como dormentes de ferrovia e considerando novamente a queima da madeira natural, observa-se uma emissão de gases de efeito estufa de 94 kgCO₂e para cada dormente de madeira plástica instalado no lugar de um de madeira natural (ver Tabela 34).

Tabela 34 – Cenário 3: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	1.535	2.544	-1.009
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	286	373	-87
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	63	80	-17
Outras (kg)	1.174	2.078	-904
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	289	383	-94
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	235	337	-102

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Nota-se também que as emissões inorgânicas referente ao dióxido de carbono são as maiores responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, contribuindo com mais de 97% dessas emissões para ambos os casos. Mais uma vez comprova-se que as emissões totais para o ar são fortemente influenciadas pelo item “outras emissões”.

A emissão de 383 kgCO₂e por unidade de dormente de madeira plástica representa o cenário de maior emissão de GEE desse material no Brasil.

Cenário 4 – Considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro

Neste cenário considera-se que ambos os materiais são queimados ao final do tempo de uso como dormente, porém a madeira é uma matéria-prima carbono-neutro. Aproveitando os resultados do Cenário 2 para madeira natural e do Cenário 3 para a madeira plástica, observa-se que se um dormente de madeira natural fosse substituído por um de madeira plástica haveria uma emissão de GEE da ordem de 280 kgCO₂e, como mostrado na Tabela 35.

Tabela 35 – Cenário 4: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	293	2.544	-2.251
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	101	373	-272
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	61	80	-19
Outras (kg)	130	2.078	-1.948
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	102	383	-281
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	48	337	-289

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A diferença entre as emissões totais para a atmosfera de 2.251 kg é boa parte explicado pelo item “outras emissões” do dormente de madeira plástica. Além disso, as maiores emissões de dióxido de carbono por unidade de dormente de madeira plástica são as principais responsáveis pelas maiores emissões de gases de efeito estufa em comparação ao de madeira natural.

Cenário 5 – Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica

Neste cenário foram verificadas as emissões de GEE provenientes da queima da madeira natural e da madeira plástica em incineradores para geração de energia elétrica ao final da vida útil como dormentes de ferrovia, em substituição ao óleo combustível. Essa hipótese foi assumida com base nos resultados dos últimos leilões de energia realizados pelo Governo Federal. No Leilão de Energia Nova A-3, realizado em setembro de 2008, das 10 usinas ofertadas, 8 são termelétricas movidas a óleo combustível, representando 75% da energia contratada. No Leilão de Energia Nova A-5, também realizado em setembro de 2008, 64% da energia contratada são de

termelétricas movidas a óleo combustível, 17 usinas dentre as 24 ofertadas (EPE, 2008a; EPE, 2008b). Segundo a base de dados do GaBi *software* (2009), a energia elétrica produzida no Brasil é gerada por usinas hidrelétricas (82,7%), termelétrica nuclear (4,0%), a gás natural (3,8%), a óleo (3,8%), a biomassa (3,3%) e a carvão (1,5%) e outros (0,9%).

O cálculo apresentado a seguir foi feito utilizando o Excel.

A análise das emissões evitadas de gases de efeito estufa foi feita com base no poder calorífico da madeira e do plástico (MJ/kg de material), na eficiência da queima (%) e dos fatores de emissão de gases de efeito estufa da queima da madeira e do plástico em incineradores para geração de energia elétrica (tCO₂/MWh). Cada um desses parâmetros influencia significativamente o total das emissões de gases de efeito estufa de cada dormente.

O valor da energia contida na madeira considerado no estudo foi de 21 MJ/kg, média para as biomassas amazônicas disponibilizada em NETO *et al.* (2009). O poder calorífico (PC) considerado para o plástico foi de 37,7 MJ/kg, valor divulgado pela Biblioteca Virtual de desenvolvimento Sustentável e Saúde Ambiental, da Organização Pan-Americana da Saúde para geração de energia proveniente da queima dos resíduos plásticos em incineradores (BVSDE, 2008).

De acordo com o Projeto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo da Usina Verde no Rio de Janeiro, a eficiência da queima do plástico em incineradores de resíduos sólidos urbanos é de 90% (USINAVERDE, 2005). MCDUGALL *et al.* (2001) considera 80% e a Associação de Fabricantes Plásticos na Europa de até 86% da recuperação energética dos plásticos (PLASTICSEUROPE, 2008). Com base nesses dados, foi assumida a eficiência de 80% da queima da madeira e do plástico em incineradores de resíduos sólidos no Brasil.

Os fatores de emissão de dióxido de carbono equivalente considerados no estudo dos Inventários do ciclo de vida da geração de termelétrica a óleo combustível e da queima da madeira e do plástico nos incineradores de resíduos sólidos foram os disponibilizados na base de dados do GaBi *software* (GABI, 2009).

Como o poder calorífico do plástico é quase o dobro daquele da madeira, a queima de cada dormente de madeira plástica produz 838 kWh, enquanto que os fabricados de madeira natural geram 467 kWh. Portanto, seria necessária uma maior quantidade de

madeira para gerar a mesma quantidade de energia produzida pelos plásticos. Resultando, assim, em um fator de emissão de 386 kgCO₂e/MWh para os dormentes de madeira natural e de 298 kgCO₂e/MWh para os de madeira plástica.

Apesar de o fator de emissão de gases de efeito estufa da termelétrica movida a óleo combustível ser quase o dobro do fator da madeira, o poder calorífico do óleo combustível (40,15 MJ/kg – BEN, 2006) é exatamente o dobro da madeira. Isso acarreta, portanto, maior emissão para a rede elétrica se a madeira fosse queimada no lugar do óleo combustível, de 20 kgCO₂e. Já para o dormente de madeira plástica, haveria uma redução evitada de 24 kgCO₂e, quando queimado em incineradores de resíduos sólidos para gerar energia elétrica, ao invés de óleo combustível.

Sendo assim, cada dormente de madeira natural passaria a emitir 122 kgCO₂e e o de madeira plástica 72 kgCO₂e, resultando em uma emissão total evitada de 50 kgCO₂e para cada dormente de madeira natural substituído por um de madeira plástica. Esses resultados estão sumariados na Tabela 36.

Tabela 36 – Cenário 5: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica - Brasil

	Madeira	Plástico	Diferença
Energia gerada (kWh/dormente)	467	838	-371
Fator de emissão do dormente (kgCO ₂ e/MWh)	386	298	88
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem queima (1)	102	96	6
Emissões evitadas (kgCO ₂ e/dormente) (2)	-20	24	-44
Total GEE (kgCO ₂ e/dormente) (1) – (2)	122	72	50
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem queima (1) – COLTRO <i>et al.</i>	48	49	-1
Emissões evitadas (kgCO ₂ e/dormente) (2) – COLTRO <i>et al.</i>	-20	24	-44
Total GEE (kgCO ₂ e/dormente) (1) – (2) – COLTRO <i>et al.</i>	68	25	43

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 6 – Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro

Neste cenário são assumidas as mesmas considerações do Cenário 5, porém, considera-se que a madeira natural é uma matéria-prima carbono-neutro. Sendo assim, a queima do dormente de madeira natural ao invés do óleo combustível para gerar a mesma quantidade de energia elétrica, poderia contribuir para evitar a emissão de 160 kgCO₂e. Com isso, a sua emissão total de gases de efeito estufa passaria de

122 kgCO₂e para uma emissão evitada de 58 kgCO₂e. E, ao contrário do cenário 5, as emissões de GEE que poderiam ser evitadas por um dormente de madeira natural são maiores do que as emissões que um dormente de madeira plástica poderia deixar de emitir, como pode ser verificado na Tabela 37.

Tabela 37 – Cenário 6: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro - Brasil

	Madeira	Plástico	Diferença
Energia gerada (kWh/dormente)	467	838	-371
Fator de emissão do dormente (kgCO ₂ e/MWh)	386	298	88
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem queima (1)	102	96	6
Emissões evitadas (kgCO ₂ e/dormente) (2)	160	24	136
Total GEE (kgCO ₂ e/dormente) (1) – (2)	-58	72	-130
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem queima (1) – COLTRO <i>et al.</i>	48	49	-1
Emissões evitadas (kgCO ₂ e/dormente) (2) – COLTRO <i>et al.</i>	160	24	136
Total GEE (kgCO ₂ e/dormente) (1) – (2) – COLTRO <i>et al.</i>	112	25	87

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 7 – Considerando a disposição (final) no aterro de ambos os materiais

Apesar da expectativa do retorno da madeira plástica para a indústria de reciclagem após a vida útil, foi elaborado um cenário que considerasse a atual realidade brasileira de dispor os resíduos de modo geral nos aterros. Como é o caso da maioria dos plásticos, já mencionado na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 3. Diante dessa questão, este cenário considera a disposição de ambos os dormentes em aterros no final do tempo de uso nas ferrovias brasileiras.

Como no estudo estão sendo considerados os dormentes de madeira natural sem tratamento químico, essa madeira descartada é classificada na NBR 10004 como um resíduo classe II – não perigoso, não oferecendo risco adicional à saúde pública, podendo, portanto, ser disposto em aterros sanitários ou queimados em fornos domésticos (ABNT, 2004).

Na licença adquirida do GaBi *software* foram disponibilizados apenas os processos de aterro sanitário que consideram a geração de energia a partir da queima do gás de lixo produzido pela decomposição de materiais compostos de carbono organicamente degradável (como madeira, papel, tecido, folhas e restos de comida). Portanto, o

cálculo somente da geração de dióxido de carbono equivalente proveniente da decomposição da madeira natural nos aterros sanitários foi feito com base nos valores *default* e na metodologia disponibilizados no guia do IPCC para elaboração de inventários nacionais de emissão de GEE (IPCC, 2006). Esse cálculo está detalhado no Anexo 5.

As emissões oriundas da decomposição de cada dormente de madeira natural no aterro são de 336 kgCO₂e. Portanto, essas emissões somadas as emissões ao longo do ciclo de vida dos dormentes (102 kgCO₂e - Cenário 2), resulta em um total de emissões de GEE de 438 kgCO₂e. Neste caso, a substituição de um dormente de madeira natural por um dormente de madeira plástica poderia evitar a emissão de 342 kgCO₂e como pode ser visto na Tabela 38.

Tabela 38 – Cenário 7: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais – Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem decomposição (1)	102	96	6
Decomposição no aterro (kgCO ₂ e) (2)	336	0	336
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) (1) + (2)	438	96	342

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Na Análise de Cenários, também foi observado o impacto nas emissões quando da consideração do tempo de uso dos dormentes instalados nas ferrovias, como pode ser visto nos seis cenários a seguir.

Cenário 8 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes

Este cenário é semelhante ao Cenário 1, porém, considera a vida útil dos dormentes de ferrovia feitos com diferentes matérias-primas. Essa suposição acarreta na contabilização do número de reposições dos dormentes na ferrovia que influencia as emissões de cada tipo de dormente. Além disso, no estudo espera-se que os dormentes de madeira plástica retornem para as recicladoras ou até mesmo que sejam depositados em aterros, visto que a recuperação energética de materiais descartados no país ainda se encontrar muito incipiente.

Por essa razão, como o Cenário 8 se apresenta mais próximo da realidade brasileira, também por considerar o número de reposição dos dormentes, ele foi escolhido no estudo como “Cenário padrão” no Brasil. Neste caso específico, algumas análises foram feitas para ilustrar este cenário, como pode ser visto após a Tabela 39.

Nas ferroviárias brasileiras a vida útil dos dormentes de madeira natural é de aproximadamente 20 anos e para os fabricados de madeira plástica é esperado 50 anos, conforme já apresentado no Capítulo 3.

Como cada dormente produzido a partir da madeira emite 289 kgCO₂e ao longo do ciclo de vida e, considerando, a substituição de 2,5 dormentes de madeira natural para cada um de madeira plástica, as emissões de GEE durante o ciclo de vida dos dormentes de madeira aumentariam para 724 kgCO₂e. Sendo assim, quando a vida útil é levada em consideração, as emissões evitadas de gases de efeito estufa passariam de 194 (Cenário 1) para 628 kgCO₂e para cada dormente de madeira natural substituído por um de madeira plástica (ver Tabela 39).

Tabela 39 – Cenário 8: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	3.837	379	3.458
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	714	92	622
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	159	67	92
Outras (kg)	2.936	219	2.716
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	724	96	628
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	588	49	539

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Análise do Cenário padrão

Como a reposição anual em toda malha ferroviária brasileira é de 4,0 milhões de dormentes, sendo 90% de madeira, o estudo considera a substituição anual de 3,6 milhões de dormentes de madeira natural pelos de madeira plástica. Sendo assim, as emissões evitadas de GEE com essa substituição, quando a vida útil é considerada, poderia chegar a 2,3 mil GgCO₂e por ano. Essas emissões evitadas podem ser melhor observadas pelo número de habitantes de determinadas regiões e das suas emissões *per capita*. Na Tabela 40 são apresentadas as emissões de carbono *per capita* da África, do Brasil, mundial, dos países da Organização para a Cooperação e

Desenvolvimento Econômico (OCDE), da Alemanha e dos Estados Unidos e o potencial dessa emissão anual evitada representado pelo número de habitantes dessas regiões. Ou seja, a reposição anual de dormentes de madeira plástica instalados no lugar dos de madeira natural representaria uma emissão evitada de 410 mil brasileiros ou de 216 mil alemães.

Tabela 40 – Emissão *per capita* anual de algumas regiões e a sua relação com o número de habitantes referentes ao cenário padrão brasileiro

Emissão	África ^a	Brasil ^b	Mundial ^a	OCDE ^a	Alemanha ^a	EUA ^a
<i>per capita</i> (tC/ano)	0,02	1,5	1,14	1,75	2,85	5,5
anuais evitadas representadas pelo número de habitantes (mil)	30.755	410	540	352	216	112

Elaboração própria com base nas Fontes: ^aROSS & MARK, 2006. ^bIBGE, 2007; NOBRE, 2008.

Segundo o estudo liderado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2000), a diferença entre o dióxido de carbono absorvido e liberado por cada hectare de Floresta Amazônica pode chegar a 5 toneladas por ano. Sendo assim, uma floresta do tamanho de quase quatro cidades do Rio de Janeiro, no Brasil, com 1.182 km² (IBGE, 2008) poderiam absorver as emissões anuais de 2,3 mil GgCO₂e.

Considerando mais uma vez a substituição anual de 3,6 milhões de dormentes de madeira a cada ano e que a partir de cada árvore é possível produzir 3 dormentes, se fossem instalados dormentes de madeira plástica ao invés dos fabricados com madeira natural, poderia ser evitado o corte anual de 1,2 milhão de árvores. Isto representa anualmente uma floresta com uma área de 30 km² ou do tamanho de 340 estádios do Maracanã no Rio de Janeiro (88 mil m²).

Cenário 9 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro

Neste cenário também é considerada a vida útil dos dormentes e que a madeira plástica retornaria para indústria de reciclagem. A única diferença com relação ao Cenário 8 é que a madeira natural está sendo considerada uma matéria-prima carbono-neutro.

Como cada dormente produzido a partir da madeira natural emite 102 kgCO₂e ao longo do ciclo de vida quando a queima da madeira não é contabilizada no ICV e considerando a substituição de 2,5 dormentes de madeira natural para cada um fabricado com madeira plástica, as emissões de GEE do dormente de madeira seriam

de 256 kgCO₂e. Mesmo quando a queima da madeira não é levada em conta, há uma emissão evitada de GEE (de 161 kgCO₂e) para cada dormente de madeira plástica colocado no lugar do dormente de madeira natural (ver Tabela 41).

Tabela 41 – Cenário 9: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	731	379	353
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	252	92	160
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	152	67	86
Outras (kg)	325	219	106
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	256	96	161
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	120	49	71

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Como podem ser observaas, as emissões de dióxido de carbono continuam sendo responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa.

Cenário 10 – Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes

No Cenário 3, quando o tempo de uso dos dormentes não é contabilizado, as emissões de GEE do dormente de madeira natural ao longo do ciclo de vida no Brasil são de 289 kgCO₂e e seriam emitidos 94 kgCO₂e para cada dormente de madeira plástica instalado no lugar de um de madeira natural. No entanto, neste cenário, no qual a queima de ambas as matérias-primas ao final do seu tempo de uso como dormentes de ferrovias e a vida útil esperada para cada uma delas estão sendo consideradas, as emissões de GEE do dormente de madeira natural aumentariam para 724 kgCO₂e. Além disso, ao contrário do Cenário 3, se ainda fosse substituído por um de madeira plástica poderia evitar a emissão de 340 kgCO₂e. Esses resultados podem ser encontrados na Tabela 42.

Tabela 42 – Cenário 10: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	3.837	2.544	1.293
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	714	373	341
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	159	80	78
Outras (kg)	2.936	2.078	857
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	724	383	340
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	588	337	251

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 11 – Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro

A diferença deste cenário para o Cenário 10 é a consideração da madeira natural como uma matéria-prima carbono-neutro. Sendo assim, quando somente a queima do plástico e a vida útil dos dormentes estão sendo contabilizadas, as emissões de gases de efeito estufa do dormente de madeira plástica (383 kgCO₂e) passam a ser maiores que o de madeira natural (256 kgCO₂e). Portanto, haveria uma emissão de 127 kgCO₂e se o dormente de madeira natural fosse substituído pelo de madeira plástica, como pode ser visto na Tabela 43.

Tabela 43 – Cenário 11: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	731	2.544	-1.813
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	252	373	-121
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	152	80	72
Outras (kg)	325	2.078	-1.753
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	256	383	-127
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) – COLTRO <i>et al.</i>	120	337	217

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 12 – Considerando a disposição (final) no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes

No último cenário calculado para o caso brasileiro, quando a vida útil é levada em consideração, está sendo considerada a disposição no aterro sanitário de 2,5 dormentes de madeira para cada dormente de madeira plástica. Sendo assim, a decomposição no aterro da madeira natural aumentaria de 336 kgCO₂e (Cenário 7) para 840 kgCO₂e, elevando a sua emissão de GEE para 1.095 kgCO₂e. Sendo o cenário a apresentar a maior emissão de GEE para o dormente de madeira natural.

As emissões evitadas que no Cenário 7 são de 342 kgCO₂e passariam a ser de 999 kgCO₂e para cada dormente de madeira plástica instalado para substituir um de madeira natural, conforme apresentado na Tabela 44.

Tabela 44 – Cenário 12: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes – Brasil

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem decomposição (1)	255	96	159
Decomposição no aterro (kgCO ₂ e) (2)	840	0	840
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) (1) + (2)	1.095	96	999

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

5.4.2 Análise de Cenários - Alemanha

O mercado de dormente de madeira natural na Alemanha, assim como no Brasil, também já está estabelecido há muitos anos e o de madeira plástica está se iniciando. Como as pesquisas e os testes ainda estão em andamento, foram elaborados os mesmos 12 cenários do estudo brasileiro (do Cenário 13 ao Cenário 24).

Cenário 13 – Considerando a queima da madeira e não do plástico

Neste primeiro cenário alemão, apesar da expectativa da destinação dos dormentes de madeira plástica ser a usina de incineração, foi verificado o impacto nas emissões quando apenas a madeira natural é queimada ao final da sua vida útil como dormente de ferrovia.

O valor das emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo de vida de cada dormente de madeira natural é de 321 kgCO₂e. Já as emissões do dormente de

madeira plástica, quando a sua queima não é levada em consideração, são de 125 kgCO₂e. Isto representa uma emissão evitada de 195 kgCO₂e quando um dormente de madeira natural é substituído por um de madeira plástica, conforme apresentado na Tabela 45.

Tabela 45 – Cenário 13: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	2.086	943	1.144
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	310	119	191
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	310	322	-12
Outras (kg)	1.455	501	954
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	321	125	195

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Assim como no estudo para o Brasil, o item “outras emissões” explica boa parte das emissões totais para a atmosfera de ambos os materiais. O mesmo nota-se para a forte contribuição das emissões inorgânicas referentes ao dióxido de carbono nas emissões de gases de efeito estufa.

Cenário 14 – Considerando a queima da madeira e não do plástico, sendo a madeira C-neutro

No entanto, quando é assumido que a madeira natural é uma matéria-prima carbono-neutro, uma vez que é extraída de uma floresta plantada, as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida de cada dormente são reduzidas de 321 para 145 kgCO₂e. Neste caso, as emissões evitadas de GEE quando um dormente de madeira natural é instalado no lugar de um dormente de madeira plástica são reduzidas de 195 para 20 kgCO₂e, como pode ser verificado na Tabela 46.

Vale lembrar que tanto neste cenário quanto em todos os outros que consideram a queima da madeira, as emissões para o ar da queima do creosoto são contabilizadas.

Tabela 46 – Cenário 14: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico, sendo a madeira C-neutro - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	935	943	-7
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	138	119	19
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	311	322	-11
Outras (kg)	485	501	-17
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	145	125	20

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 15 – Considerando a queima da madeira e do plástico

Neste cenário são contabilizadas as emissões provenientes da queima dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica quando se espera que sejam destinados para as usinas de incineração com recuperação de energia.

Sendo assim, ao contrário dos outros dos cenários alemães anteriores, o dormente de madeira plástica emite mais gases de efeito estufa que o dormente de madeira plástica. Observa-se que há uma emissão de 148 kgCO₂e para cada dormente de madeira natural substituído por um de madeira plástica, como apresentado na Tabela 47.

Tabela 47 – Cenário 15: Comparação das emissões de por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	2.086	3.521	-1.435
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	310	453	-143
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	310	338	-28
Outras (kg)	1.455	2.715	-1.260
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	321	469	-148

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

A emissão de 469 kgCO₂e por unidade de dormente de madeira plástica representa o cenário de maior emissão de GEE desse material na Alemanha.

Cenário 16 – Considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro

De acordo com os Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes, no qual se considerada a queima em incineradores (com recuperação energética) de ambos os materiais após o seu tempo de uso na ferrovia, e o fato da madeira ser extraída da floresta plantada, este cenário se encontra mais próximo da realidade alemã.

Como pode ser observado na Tabela 48, a emissão de gases de efeito estufa seria ainda maior caso o dormente de madeira plástica substituísse um de madeira natural (324 kgCO₂e). O mesmo pode ser verificado para as emissões totais (2.586 kgCO₂e).

Tabela 48 – Cenário 16: Comparação das emissões de por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	935	3.521	-2.586
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	138	453	-315
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	311	338	-27
Outras (kg)	485	2.715	-2.230
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	145	469	-324

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 17 – Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica

Quando a madeira impregnada e a madeira plástica são queimadas em incineradores para gerar energia elétrica no lugar do carvão, do urânio enriquecido e do gás natural, a emissão evitada de gases de efeito estufa referente a essa substituição de recursos energéticos poderia ser levada em consideração. A energia elétrica na Alemanha é gerada por termelétricas a carvão (50%), nucleares (29%), a gás natural (10%), hidrelétricas (5%) e outros (6%) (GABI, 2009).

Assim como no estudo brasileiro, o cálculo apresentado a seguir foi feito utilizando o Excel.

A emissão evitada de gases de efeito estufa foi calculada com base no poder calorífico da madeira e do plástico (MJ/kg de material), na eficiência da queima do plástico e da madeira em incineradores (com recuperação de energia) de resíduos sólidos urbanos

(%) e nos fatores de emissão de gases de efeito estufa da queima da madeira e do plástico e da rede elétrica alemã (tCO₂/MWh).

A energia contida na madeira natural considerada em WERNER *et al.* (2008) é de 17,7 MJ/kg. De acordo com o Sistema Dual Alemão a energia contida nos resíduos plásticos é de 34,4MJ/kg (DSD, 2005). Segundo MCDUGALL *et al.* (2001) a eficiência dos incineradores (com recuperação de energia) de resíduos sólidos urbanos é de 80% e a Associação de Fabricantes Plásticos na Europa considera uma eficiência da recuperação energética dos plásticos de até 86% (PLASTICSEUROPE, 2008). Sendo assim, foi considerada neste trabalho a eficiência de 80% da queima da madeira e do plástico em incineradores de resíduos sólidos na Alemanha.

Os fatores de emissão considerados no estudo da rede elétrica e da queima da madeira e do plástico nos incineradores de resíduos sólidos alemães foram os disponibilizados na base de dados do GaBi *software* (GABI, 2009).

Como pode ser observado na Tabela 49, haveria uma redução evitada de 84 kgCO₂e e de 263 kgCO₂e quando cada dormente de madeira natural e de madeira plástica, respectivamente, fossem queimados em incineradores (com recuperação de energia) de resíduos sólidos para gerar energia elétrica ao invés dos combustíveis fósseis. Sendo assim, as emissões totais de GEE do dormente de madeira natural seriam de 61 kgCO₂e, enquanto que o dormente de madeira plástica poderia ainda evitar a emissão de 138 kgCO₂e. Portanto, poderia haver uma emissão total evitada de 199 kgCO₂e quando o dormente de madeira plástica fosse instalado no lugar de um de madeira natural.

Tabela 49 – Cenário 17: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica - Alemanha

	Madeira	Plástico	Diferença
Energia gerada (kWh/dormente)	393	764	-371
Fator de emissão do dormente (kgCO ₂ e/MWh)	458	327	131
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem queima (1)	145	125	20
Emissões evitadas (kgCO ₂ e/dormente) (2)	84	263	-179
Total GEE (kgCO ₂ e/dormente) (1) - (2)	61	-138	199

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 18 – Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro

Entretanto, considerando novamente a madeira como uma matéria-prima carbono-neutro, e assumindo as mesmas considerações do cenário anterior, as emissões evitadas de gases de efeito estufa para cada dormente de madeira natural aumentariam de 84 (Cenário 17) para 264 kgCO₂e, resultando, assim, em uma emissão total evitada de 19 kgCO₂e, como pode ser verificado na Tabela 50. Contudo, as emissões de GEE que poderiam ser evitadas por cada dormente de madeira plástica ainda são maiores do que as emissões que o dormente de madeira natural poderia evitar.

Tabela 50 – Cenário 18: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro - Alemanha

	Madeira	Plástico	Diferença
Energia gerada (kWh/dormente)	393	764	-371
Fator de emissão do dormente (kgCO ₂ e/MWh)	458	327	131
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem queima	145	125	20
Emissões evitadas (kgCO ₂ e/dormente)	264	263	1
Total GEE (kgCO ₂ e/dormente)	-119	-138	19

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 19 – Considerando a disposição (final) no aterro de ambos os materiais

Na Alemanha, como verificado anteriormente, os dados de 2005 indicaram um potencial disponível de polietileno de alta densidade de 317 mil toneladas que poderiam contribuir para atender a demanda deste material para fabricação de dormentes de ferrovia. Embora a tendência seja de redução da disposição dos resíduos plásticos em aterros sanitários e o aumento da sua reciclagem energética (como visto no Capítulo 3), esse cenário busca comparar as emissões de GEE de ambos os materiais se fossem dispostos em aterros sanitários ao invés de serem destinados para indústria de reciclagem energética.

Como no estudo de caso alemão estão sendo considerados os dormentes de madeira natural impregnados com creosoto, o tratamento dado na disposição final desse material deve estar de acordo com as emissões definidas na Lei Federal de Controle da Poluição alemã, como já mencionado no Capítulo 4.

Assim como no Cenário 7, o cálculo da geração de CO₂e da decomposição da madeira natural nos aterros industriais foi feito com base nos valores *default* e na metodologia disponibilizados no guia do IPCC para elaboração de inventários nacionais de emissão de GEE (IPCC, 2006), maiores detalhes podem ser encontrados no Anexo 5.

As emissões provenientes da decomposição de cada dormente de madeira natural no aterro são de 313 kgCO₂e, menores que no Brasil (336 kgCO₂e) em função do menor peso do dormente de madeira natural na Alemanha (80 kg). Essas emissões de GEE adicionadas as emissões ao longo do ciclo de vida dos dormentes (145 kgCO₂e - Cenário 14), resulta em um total de emissões de GEE de 458 kgCO₂e. Sendo assim, quando cada dormente de madeira natural é substituído por um dormente de madeira plástica poderia ser evitada a emissão de 333 kgCO₂e (ver Tabela 51).

Tabela 51 – Cenário 19: Comparação das emissões de cada dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais – Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem decomposição (1)	145	125	20
Decomposição no aterro (kgCO ₂ e) (2)	313	0	313
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) (1) + (2)	458	125	333

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Do mesmo modo que nos cenários brasileiros, também foi verificado o impacto nas emissões quando o tempo de uso de cada dormente instalado na ferrovia é levado em consideração. Essa análise está apresentada nos seis cenários a seguir.

Cenário 20 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes

Nas ferroviárias alemãs a vida útil dos dormentes de madeira é de aproximadamente 30 anos e para os produzidos de madeira plástica é esperado 50 anos (como apresentado no Capítulo 3). Como cada dormente produzido a partir da madeira emite 321 kgCO₂e durante o seu ciclo de vida de 30 anos (Cenário 13) e, considerando a substituição de 1,67 dormentes de madeira natural para cada um fabricado de madeira plástica, as emissões durante o ciclo de vida dos dormentes de madeira passam a ser de 535 kgCO₂e. Sendo assim, quando a vida útil é levada em conta, as emissões

evitadas são de 410 kgCO₂e para cada dormente de madeira plástica instalado no lugar de um de madeira natural, como pode ser visto na Tabela 52.

Tabela 52 – Cenário 20: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	3.477	943	2.534
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	516	119	397
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	517	322	195
Outras (kg)	2.425	501	1.924
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	535	125	410

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Cenário 21 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro

Como cada dormente produzido a partir da madeira natural emite 145 kgCO₂e ao longo do ciclo de vida quando a queima da madeira não é contabilizada no ICV (Cenário 14) e, considerando a substituição de 1,67 dormentes de madeira para cada um produzido com madeira plástica, as emissões totais dos dormentes de madeira aumentam para 242 kgCO₂e. Neste caso, as emissões evitadas de GEE são de 116 kgCO₂e para cada dormente de madeira natural substituído por um de madeira plástica (ver Tabela 53).

Tabela 53 – Cenário 21: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	1.559	943	616
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	230	119	111
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	519	322	197
Outras (kg)	808	501	307
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	242	125	116

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Assim como os cenários anteriores elaborados para o estudo alemão, o item “outras emissões” explica boa parte das emissões totais para o ar do dormente de madeira

natural e plástica. O mesmo pode ser observado para a forte contribuição do dióxido de carbono nas emissões de gases de efeito estufa.

Cenário 22 – Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes

Como visto no Cenário 15, no qual a vida útil não é contabilizada, as emissões de GEE do dormente de madeira natural ao longo do ciclo de vida na Alemanha são de 321 kgCO₂e e haveria uma emissão de 148 kgCO₂e para cada dormente de madeira plástica instalado para substituir um de madeira natural. Entretanto, nesse cenário, poderia haver uma emissão total de GEE evitada, de 66 kgCO₂e, se o dormente de madeira natural fosse substituído por um de madeira plástica. Isso porque as emissões do dormente de madeira natural aumentariam para 535 kgCO₂e, como pode ser verificado na Tabela 54.

Tabela 54 – Cenário 22: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	3.477	3.521	-44
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	516	453	63
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	517	338	178
Outras (kg)	2.425	2.715	-290
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	535	469	66

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

No entanto, as emissões totais para o ar do dormente de madeira natural, influenciadas pelas “outras emissões”, continuam sendo menores do que o de madeira plástica.

Cenário 23 – Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro

No cenário 23, assim como no Cenário 22, se considera os anos de serviço do dormente na ferrovia e que ambos os materiais são destinados para usina de incineração (com recuperação de energia) no final do tempo de uso, porém, neste caso a madeira natural é considerada como uma matéria-prima carbono-neutro.

Como discutido anteriormente, a madeira natural é extraída de floresta alemã plantada para esse fim e as emissões provenientes da sua queima poderiam ser descontadas

das emissões totais calculadas no ICV. Portanto, o Cenário 23, que mais se assemelha a realidade alemã, tende a ser o mais provável, sendo definido como o “Cenário padrão” na Alemanha.

No entanto, se a madeira natural é considerada carbono-neutro, contabilizando somente a queima do plástico e a vida útil dormentes de ferrovias, as emissões de gases de efeito estufa do dormente de madeira plástica (de 469 kgCO₂e – Cenário 22) passam a ser maiores que o de madeira natural (242 kgCO₂e – Cenário 21). Conforme apresentado na Tabela 55, haveria uma emissão de 227 kgCO₂e para cada dormente de madeira plástica instalado para substituir um de madeira natural.

Tabela 55 – Cenário 23: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro - Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
Totais para o ar (kg)	1.559	3.521	-1.962
Inorgânica referente ao CO ₂ (kg)	230	453	-223
Inorgânica referente ao vapor de água (kg)	519	338	181
Outras (kg)	808	2.715	-1.943
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e)	242	469	-227

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

Também pode ser observada uma menor emissão total para o ar do dormente de madeira natural influenciada principalmente pelas menores emissões (não possível de serem identificadas) do item “outras emissões”.

Neste caso específico, como foi verificada uma menor emissão de GEE do dormente de madeira natural do que de madeira plástica, não foram realizadas as mesmas análises feitas no estudo brasileiro para o cenário padrão que contabilizam as emissões absorvidas pelas florestas. Do mesmo modo, também não foi verificado o número de corte de árvores que poderia ser evitado caso na reposição anual dos dormentes de madeira natural fossem instalados dormentes de madeira plástica.

Cenário 24 – Considerando a disposição (final) no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes

O último cenário calculado para o caso alemão é semelhante ao Cenário 19, mas se diferencia na contabilização da vida útil dos dormentes de ferrovia.

Neste caso, a emissão de GEE do dormente de madeira natural disposto no aterro aumenta de 458 kgCO₂e para 765 kgCO₂e (maior cenário de emissão de GEE do dormente de madeira natural). Como pode ser visto na Tabela 56, as emissões evitadas que no Cenário 19 são de 333 kgCO₂e aumentariam para 640 kgCO₂e para cada dormente de madeira natural substituído por um de madeira plástica.

Tabela 56 – Cenário 24: Comparação das emissões por unidade de dormente considerando a disposição no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes – Alemanha

Tipo de emissão	Madeira	Plástico	Diferença
GEE (kgCO ₂ e/dormente) – sem decomposição (1)	242	125	117
Decomposição no aterro (kgCO ₂ e) (2)	523	0	523
Gases de efeito estufa (kgCO ₂ e) (1) + (2)	765	125	640

Elaboração própria com base na Fonte: GABI, 2009.

5.4.3 Resumo da Análise de Cenários

Neste item é apresentado um resumo da Análise de Cenário realizada para o Brasil e para a Alemanha com base nos quatro Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes de ferrovia.

Esta análise contribuiu para avaliar os impactos nas emissões atmosféricas das diferentes considerações feitas no estudo, como as três possibilidades de destinações dos dormentes (incineração com recuperação de energia, reciclagem mecânica e aterro). Além disso, também serviu para a análise do impacto nas emissões quando se considera ou não a madeira natural como uma matéria-prima carbono-neutro e os anos de vida útil dos dormentes produzidos com diferentes matérias-primas.

Na Tabela 57 são apresentadas as emissões totais de gases de efeito estufa de cada dormente de madeira natural e de madeira plástica ao longo do ciclo de vida em cada um dos 24 cenários elaborados no estudo. Dentre eles, oito cenários brasileiros e nove cenários alemães indicaram a madeira plástica como a matéria-prima com menor emissão de gases de efeito estufa para fabricação dos dormentes de ferrovia nesses países analisados.

Tabela 57 – Emissões de gases de efeito estufa por unidade de dormente de madeira natural e de madeira plástica segundo os 24 cenários (kgCO₂e)

Cenários	Emissões de GEE (kgCO ₂ e)			
	Brasil		Alemanha	
	Madeira	Plástico	Madeira	Plástico
Cenário 1 e Cenário 13 – Considerando a queima da madeira e não do plástico	289	96	321	125
Cenário 2 e Cenário 14 – Considerando a queima da madeira e não do plástico, sendo a madeira C-neutro	102	96	145	125
Cenário 3 e Cenário 15 – Considerando a queima da madeira e do plástico	289	383	321	469
Cenário 4 e Cenário 16 – Considerando a queima da madeira e do plástico, sendo a madeira C-neutro	102	383	145	469
Cenário 5 e Cenário 17 – Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica	122	72	61	-138
Cenário 6 e Cenário 18 - Considerando a queima da madeira e do plástico para geração de energia elétrica, sendo a madeira C-neutro	-58	72	-119	-138
Cenário 7 e Cenário 19 - Considerando a disposição no aterro de ambos os materiais	438	96	458	125
Cenário 8 e Cenário 20 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes	724	96	535	125
Cenário 9 e Cenário 21 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro	256	96	242	125
Cenário 10 e Cenário 22 - Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes	724	383	535	469
Cenário 11 e Cenário 23 - Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes, sendo a madeira C-neutro	256	383	242	469
Cenário 12 e Cenário 24 - Considerando a disposição no aterro de ambos os materiais e a vida útil dos dormentes	1.095	96	765	125

Fonte: Elaboração própria

Tomando como exemplo os Cenários 3 e 15 e analisando apenas a categoria de impacto ambiental “Aquecimento global”, nota-se que quando é considerada a queima da madeira natural e da madeira plástica, a madeira natural seria indicada tanto no Brasil como na Alemanha. No entanto, neste caso a vida útil não está sendo levada em consideração, como é o caso dos Cenários 10 e 22. Nesses dois últimos, o quadro se inverte e a madeira plástica é indicada como matéria-prima que menos emite gases de efeito estufa para fabricação dos dormentes.

Já quando se considera a madeira natural como uma matéria-prima de carbono-neutro, chega-se a diferentes resultados dependendo das outras suposições para o mesmo cenário. Nos Cenário 2 e 14, nos quais apenas a madeira natural é queimada ao final do tempo de uso, a madeira plástica é mais apropriada. No entanto, quando também se considera que a destinação da madeira plástica é a incineração, como nos Cenários 4 e 16, a madeira natural é a mais adequada para produção de dormentes ferroviários em ambos os países. Mas, quando essa queima é destinada para geração de energia elétrica (Cenários 6 e 18), o resultado muda apenas para a Alemanha, passando, assim, a indicar a madeira plástica. Já no Brasil, a madeira natural permanece sendo a matéria-prima de menor emissão de gases de efeito estufa. Isso porque o potencial de emissões evitadas com a queima da madeira plástica no lugar dos combustíveis fósseis utilizados na rede elétrica alemã é maior que no caso brasileiro. Por fim, no caso da consideração da queima de ambos os materiais no final da vida útil como dormentes e dos respectivos tempos de serviço na ferrovia, Cenários 11 e 23 (Cenário padrão alemão), a madeira natural é mais adequada, em termos de emissão de GEE, para produção de dormentes de ferrovia nos dois países analisados.

Entretanto, nos Cenários 8 (Cenário padrão brasileiro) e 20, nos quais apenas a madeira natural é queimada no final do tempo de uso e se considera a vida útil dos dormentes, a madeira plástica passa a emitir menos gases de efeito estufa do que o de madeira natural.

Finalmente, nos quatro cenários em que se assume a disposição final no aterro de ambos os materiais (Cenários 7, 12, 19 e 24), as emissões provenientes da decomposição da madeira natural em condições anaeróbicas levam a indicação da madeira plástica para fabricação dos dormentes de ferrovia no Brasil e na Alemanha. Dentre os 24 cenários elaborados, esses são os que apresentam maior emissão evitada de gases de efeito estufa devido à biodegradação da celulose. Por outro lado, os cenários que apresentam menor emissão evitada de GEE são os 2 e 14, nos quais

apenas a madeira natural é queimada no final do tempo de uso, mas é considerada uma matéria-prima carbono-neutro.

Para simplificar a visualização dos resultados da Análise de Cenários apresentados na Tabela 57, foi construída a Figura 31 de forma a ilustrar os 12 cenários brasileiros que compara as emissões de gases de efeitos estufa dos dois tipos de dormentes.

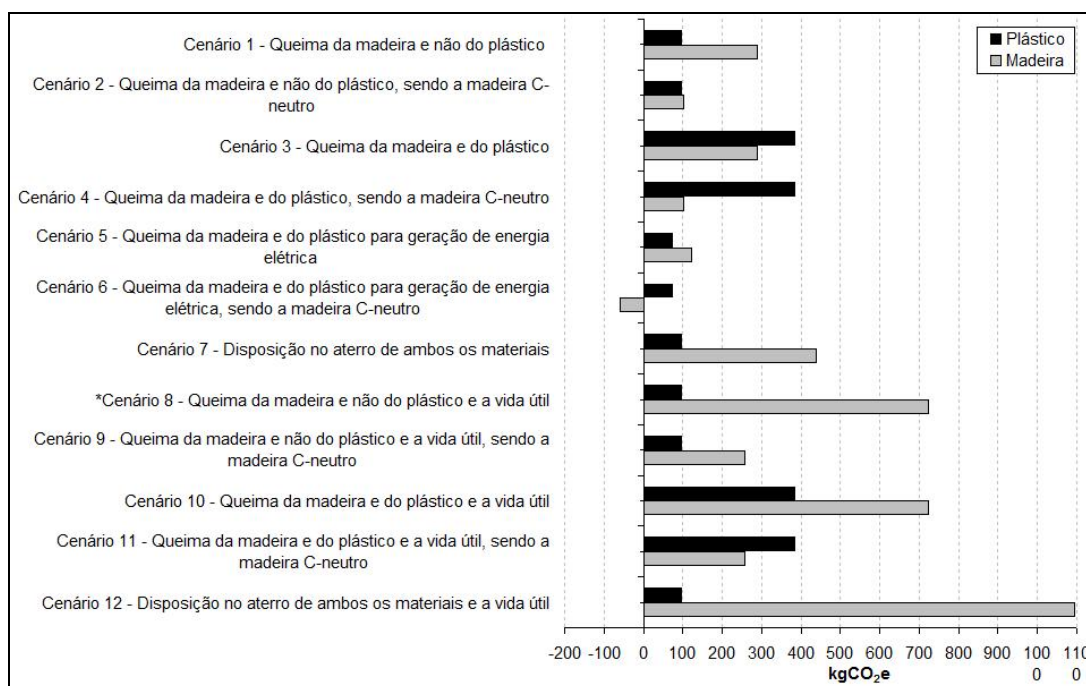


Figura 31 – Brasil: 12 Cenários de emissão de gases de efeito estufa por unidade de dormente de madeira natural e de madeira plástica (kgCO₂e)

Fonte: Elaboração própria

Nesse sentido, o mesmo foi feito para os 12 cenários alemães na Figura 32.

Para a análise do impacto da variação da vida útil nas emissões de gases de efeito estufa no decorrer dos anos foram escolhidos o Cenário 8 – Considerando a queima da madeira e não do plástico e a vida útil dos dormentes -, e o Cenário 23 - Considerando a queima da madeira e do plástico e a vida útil dos dormentes -, ambos definidos como “Cenário padrão” no Brasil e na Alemanha, respectivamente. Lembrando que esses dois casos foram elaborados com base nos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 4.

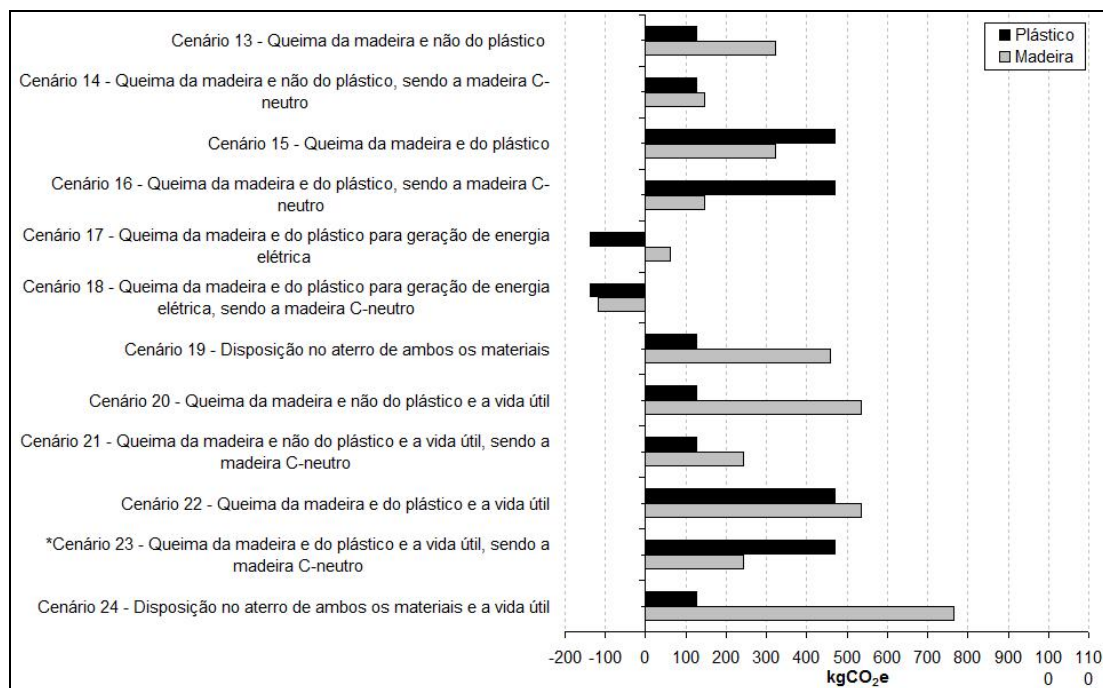


Figura 32 - Alemanha: 12 Cenários de emissão de gases de efeito estufa por unidade de dormente de madeira natural e de madeira plástica (kgCO₂e)

Fonte: Elaboração própria

Inicialmente, foi verificado o caso brasileiro, no qual o tempo da vida útil do dormente de madeira natural é de 20 anos e a expectativa para o dormente de madeira plástica é de 50 anos. Como pode ser observado na Figura 33, o dormente de madeira natural emite mais gases de efeito estufa do que o de madeira plástica ao longo de todo o seu tempo de uso em função da necessidade de mais reposição desses dormentes na ferrovia. Sendo assim, para este caso específico onde se considera a troca de dormentes a cada 20 anos, a madeira plástica seria indicada como matéria-prima para substituir a madeira natural na fabricação dos dormentes ferroviários no Brasil.

Entretanto, ao contrário da realidade brasileira, na Alemanha considera-se que ambos os materiais são queimados em incineradores no final do tempo de uso como dormente. Além disso, espera-se 30 anos de vida útil para os dormentes de madeira natural e os mesmos 50 anos para os de madeira plástica. Por isso, observou-se uma maior emissão do dormente de madeira plástica ao longo de todo o tempo de uso em comparação ao de madeira natural. Sugerindo, assim, que se continue utilizando a madeira natural como matéria-prima para produção dos dormentes alemães, como pode ser visto na Figura 34.

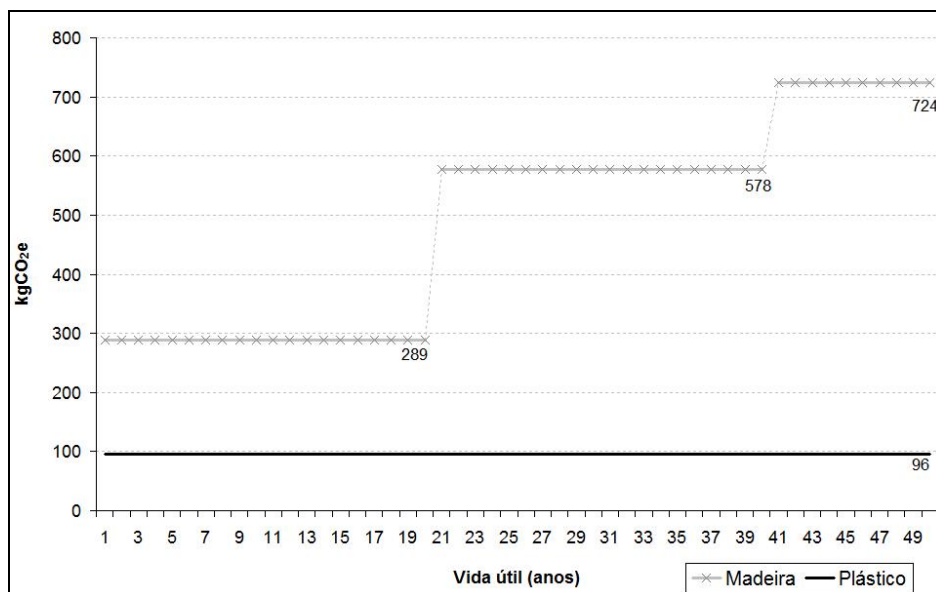


Figura 33 – Cenário 8: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Brasil

Fonte: Elaboração própria

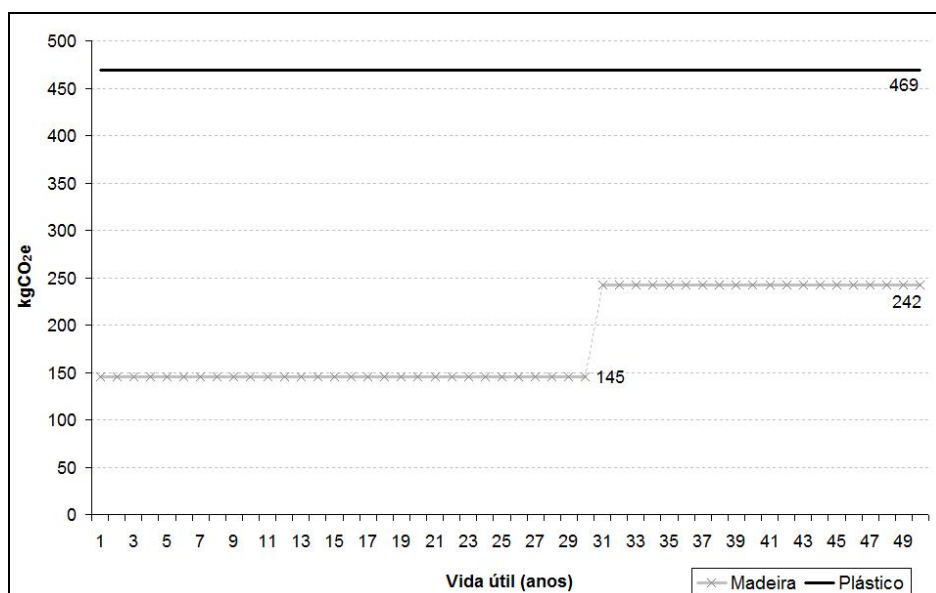


Figura 34 – Cenário 23: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Alemanha

Fonte: Elaboração própria

Contudo, verifica-se que as diferentes considerações feitas na Análise de Cenários, variando o limite da fronteira do sistema e levando em conta a vida útil dos dormentes, influenciam significativamente as emissões de gases de efeito estufa de cada unidade de dormente. No estudo brasileiro, observa-se que nos primeiros vinte anos a diferença entre o dormente de madeira natural e de madeira plástica é de 193 kgCO₂e

e quando chegam os cinquenta anos, aumenta para 628 kgCO₂e. Já na Alemanha acontece justamente o contrário. Nos primeiros 30 anos a comparação entre os dois dormentes apresenta uma diferença de 324 kgCO₂e e no final do tempo de uso essa diferença diminui para 227 kgCO₂e.

No entanto, quando outras suposições são assumidas, como a queima em incinerados (com recuperação de energia) dos dormentes de madeira plástica no Brasil (Cenário 10), observa-se que nos primeiros vinte anos as emissões de GEE do dormente de madeira plástica seriam 94 kgCO₂e maiores que as da madeira plástica. Mas, ao final dos cinquenta de vida útil, esse quadro se inverteria e as emissões do dormente de madeira natural seriam 341 kgCO₂e maiores (ver Figura 35).

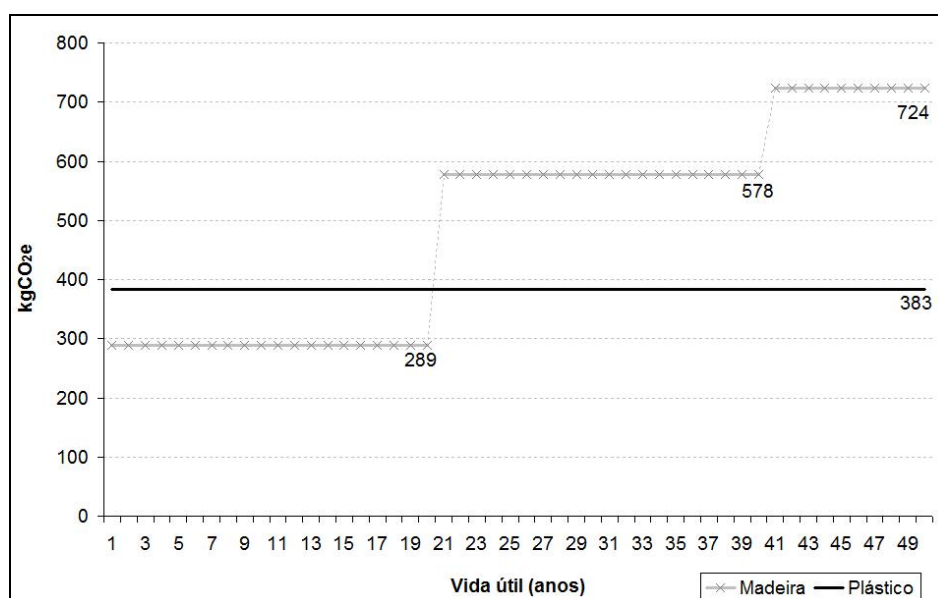


Figura 35 - Cenário 10: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Brasil

Fonte: Elaboração própria

O mesmo pode ser observado no Cenário 22 alemão, semelhante ao Cenário 10 brasileiro, no qual inicialmente o dormente de madeira plástica emite 148 kgCO₂e se instalado para substituir um de madeira natural. Mas, no final dos cinquenta anos esse quadro se inverte, e o dormente de madeira plástica pode evitar a emissão de 66 kgCO₂e, como pode ser visto na Figura 36.

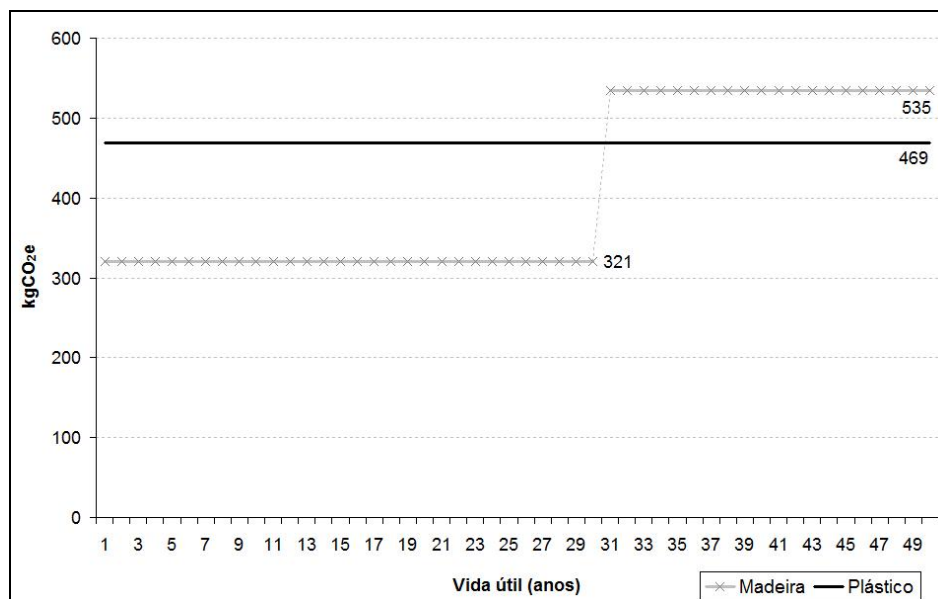


Figura 36 - Cenário 22: Emissão de gases de efeito estufa dos dormentes ao longo do tempo de uso – Alemanha

Fonte: Elaboração própria

No caso dos quatro cenários brasileiros e dos três cenários alemães que indicaram a madeira natural como matéria-prima para fabricação dos dormentes ao invés da madeira plástica, essa última apresentaria ao longo de todos os cinquenta anos uma emissão maior que a madeira natural. Ou seja, a curva das emissões de GEE da madeira natural não cruzaria a da madeira plástica.

A Análise de Cenários também possibilitou uma avaliação mais otimista e mais pessimista das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica nos dois países analisados. Nesse sentido, analisando os 12 cenários brasileiros para o dormente de madeira natural, verifica-se que essas emissões podem variar de -58 até 1.095 kgCO₂e, apresentando o maior intervalo dentre os quatro casos do estudo. Já esses dormentes fabricados na Alemanha apresentaram um intervalo menor, variando entre -119 e 763 kgCO₂e. Por outro lado, o dormente de madeira plástica produzido no Brasil apresentou a menor variação, de 72 a 383 kgCO₂e. Na Alemanha as suas emissões de GEE variam entre -138 e 469 kgCO₂e. Essas emissões estão ilustradas na Tabela 58.

Tabela 58 – Intervalo das emissões de gases de efeito estufa (kgCO₂e)

Emissões de GEE (kgCO ₂ e)		Mínimo (Cenário pessimista)	Máximo (Cenário otimista)
BRASIL	Madeira	-58 (Cenário 6)	1.095 (Cenário 12)
	Plástico	72 (Cenários 5 e 6)	383 (Cenários 3, 4, 10 e 11)
ALEMANHA	Madeira	-119 (Cenário 18)	765 (Cenário 24)
	Plástico	-138 (Cenários 17 e 18)	469 (Cenários 15, 16, 22 e 23)

Fonte: Elaboração própria

5.4.4 Considerações

Este estudo apresenta, com base na ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida, diferentes resultados do potencial de emissão de gases de efeito estufa de duas matérias-primas usadas para produzir dormentes de ferrovias no Brasil e na Alemanha. Como a ACV analisa o impacto ambiental de um produto de forma holística, de maneira a auxiliar na escolha do produto que menos cause impacto negativo no meio ambiente, algumas questões envolvidas neste estudo devem ser discutidas. Tais como determinadas abordagens do *software* de ACV utilizado no estudo, os cenários definidos como padrões para cada país, a consideração da madeira natural como matéria-prima carbono-neutro e os valores *default* utilizados na conta da decomposição da madeira no aterro.

GaBi software

O *software* de Avaliação do Ciclo de Vida utilizado neste trabalho, o GaBi, e o banco de dados nele disponibilizado, permitiram a elaboração dos quatro Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes de ferrovia. Dois deles para o estudo de caso brasileiro e mais dois para o caso alemão. Além disso, possibilitou a identificação de categorias de impacto ambiental em cada ICV.

Na verificação das maiores influências das emissões para o ar dos quatro Inventários, foi identificada a forte contribuição do item “outras emissões”. No entanto, a equipe de suporte do *software* informou que este item foi criado para generalizar os gases que estão presentes em uma exaustão, mas que não foi possível definir ao certo a sua composição separadamente. Sendo assim, a análise do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida dos dormentes de ferrovia no Brasil e na Alemanha realizada no estudo se limitou as emissões de gases de efeito estufa, devido à falta de informação mais detalhada no GaBi sobre o item “outras emissões”, além de ser também de ser um dos objetivos iniciais da tese: avaliar as emissões de gases de efeito estufa.

Outra questão é a contabilização da vida útil das matérias-primas analisadas para comparação das emissões de gases de efeito estufa ao longo de todo o ciclo de vida dos dormentes analisados. O *software* não oferece uma ferramenta que possibilite essa contabilização, sendo necessário o uso de outros programas, como o Excel, que multipliquem todas as emissões (apresentadas no Anexo 4) pelo fator que contabiliza a vida útil de cada produto. No caso dos dormentes brasileiros, esse fator é 2,5 e na Alemanha 1,67.

Na base de dados disponível no GaBi o fator de emissão para o ar do dióxido de carbono do Inventário do Ciclo de Vida da geração de energia elétrica brasileira é de 0,759 tCO₂/MWh. Já na Alemanha esse fator é menor, de 0,672 tCO₂/MWh. Como visto anteriormente, a matriz de energia elétrica brasileira considerada na base de dados do GaBi *software* para o ano de 2002 é composta por usinas hidrelétricas (82,7%), termelétrica nuclear (4,0%), a gás natural (3,8%), a óleo (3,8%), a biomassa (3,3%) e a carvão (1,5%) e outros (0,9%). Na Alemanha a energia elétrica gerada em 2002 provem de termelétricas a carvão (50%), nucleares (29%), a gás natural (10%), hidrelétricas (5%) e outros (6%). Segundo a equipe de suporte do GaBi, o maior fator de emissão da rede elétrica brasileira deve-se às emissões decorrentes da decomposição da matéria orgânica nos reservatórios e ao concreto usado na construção das barragens das usinas hidrelétricas.

No entanto, segundo o inventário da geração e da distribuição de energia elétrica no Brasil em 2000, elaborado por COLTRO *et al.* (2003), a emissão atmosférica do dióxido de carbono é de 0,124 tCO₂/MWh. Nesse estudo, está sendo considerada que 93,5% da energia elétrica são produzidas por usinas hidrelétricas e 6,5% por usinas termelétricas.

Outro fator de emissão de dióxido de carbono para energia elétrica encontrado na literatura especializada para fins de comparação é o calculado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT). O MCT disponibiliza na sua página da internet dois tipos de fator de emissão de CO₂, um deles é para ser usado em inventários. O fator médio divulgado para o ano de 2006 (ano mais próximo do inventário brasileiro disponibilizado no GaBi) foi de 0,0323 tCO₂/MWh²⁷. Ele é calculado a partir da média das emissões da geração do Sistema Interligado Nacional, considerando todas as usinas que estão gerando energia e não somente aquelas que estejam operando na margem para atender a demanda nos horários de pico. Esse fator estima a quantidade de CO₂ associada a uma geração de energia elétrica em um determinado período (MCT, 2006).

Entretanto, na elaboração dos ICVs dos dormentes foram considerados os fatores de emissão do Inventário do Ciclo de Vida *Power grid mix* para o Brasil disponíveis pela *PE International* no *GaBi databases 2006*. Isso porque, a tese se propõe a realizar uma análise comparativa entre o ciclo de vida dos dormentes de ferrovia produzidos no Brasil e na Alemanha e esse inventário utiliza a mesma metodologia para a rede elétrica alemã. Possibilitando, assim, uma comparação entre os ICVs dos dormentes de cada país.

Cenário-padrão

Os cenários definidos como padrão no estudo, Cenário 8 brasileiro - queima da madeira e não do plástico e vida útil -, e o Cenário 23 alemão - queima da madeira e do plástico e vida útil -, indicaram diferentes matérias-primas para fabricação de dormentes. O primeiro sugere a madeira plástica e o segundo a madeira natural. Isso porque no Cenário 8, a substituição do dormente de madeira natural pelo de madeira plástica pode evitar a emissão de 628 kgCO₂e para atmosfera. O contrário ocorre no Cenário 23, no qual o dormente de madeira plástica instalado no lugar do dormente de madeira natural emite 227 kgCO₂e. Ou seja, as diferentes realidades de cada país levam a diferentes matérias-primas indicadas para produção de dormentes ferroviários.

Carbono-neutro

No Inventário do Ciclo de Vida dos dormentes da Alemanha a madeira utilizada para produzi-los provém de floresta plantada. Uma vez que esta matéria-prima é originária

²⁷ Fator Médio Anual de 2008 foi de 0,0484 tCO₂/MWh (MCT).

de árvores plantadas para este fim, é aceitável a não consideração das emissões de carbono provenientes da queima da madeira no final do tempo de uso, classificando-a, assim, como uma matéria-prima carbono-neutro. O conceito “carbono-neutro” surge nos debates sobre aquecimento da temperatura global representando uma nova maneira das empresas comunicarem aos consumidores sua preocupação e conscientização ambiental.

Visto por essa ótica, o Cenário 23 - queima da madeira e do plástico e vida útil, sendo a madeira C-neutro -, foi escolhido no estudo como o “Cenário-padrão” para o caso alemão.

Entretanto, se a discussão internacional sobre a responsabilidade histórica dos países fosse levada em consideração, o cenário escolhido poderia ser o 22, semelhante ao Cenário 23, porém não considera a madeira carbono-neutro.

Como mencionado no Capítulo 3, a floresta original que cobria 93% do território alemão 8 mil anos atrás (cerca de 33 milhões de hectares) não existe mais, tendo sido totalmente desmatada (especialmente após a Revolução Industrial). Ou seja, a atual área florestada, que cobre 30% do território daquele país (36 milhões de hectares), não é original, sendo fruto de muitos anos de projetos de reflorestamento. A extração da madeira para fabricação de dormente de ferrovia naquele país, portanto, é feita em florestas plantadas.

Por outro lado, a região amazônica ainda apresenta grandes extensões de cobertura vegetal nativa, uma vez que ali o desmatamento em grande escala começou apenas na década de 1970, seguindo uma curva crescente até os dias atuais, devido às deficiências do controle, da fiscalização e etc.

Essa tendência tem contribuído para aumentar a participação do Brasil no aquecimento global e na perda de biodiversidade da região e, graças a isso, hoje é um dos maiores emissores de gases do efeito estufa.

Vale dizer que esse tem sido um tema recorrente nas discussões sobre a Mudança do Clima, principalmente nas discussões pós-Kyoto sobre a responsabilidade dos países com relação às suas emissões históricas (ou seja, a contribuição de cada nação ao longo do tempo, e, em especial, após a Revolução Industrial, para aumento da temperatura da Terra aos níveis atuais).

Existem diversos trabalhos e pesquisas que discutem a fundo esse assunto. Na Universidade Federal do Rio de Janeiro, esse é um dos temas de estudo do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (IVIG/COPPE/UFRJ), que elabora banco de dados de emissões históricas de gases de efeito estufa de diversos setores e países. O IVIG trabalhou em parceria com o Ministério de Ciência e Tecnologia e participou do grupo internacional *ad hoc* sobre Modelagem e Avaliação das Contribuições para a Mudança do Clima (MATCH). Fruto dessa linha de pesquisa, existe uma série de trabalhos, dentre eles de CAMPOS *et al.* (2005) e HÖHNE *et al.* (2009).

Diante dessa discussão, se o Cenário 22 fosse considerado como padrão, poderia se argumentar que apesar de na Alemanha a árvore ser extraída de floresta plantada, as emissões causadas pelo desmatamento da floresta nativa original (que representavam um estoque de carbono) não seriam compensadas por essas novas florestas, plantadas para fins comerciais (que representam um fluxo de carbono). Por mais que as atuais florestas absorvam carbono da atmosfera durante o seu crescimento, a sua exploração devolve esse carbono para a atmosfera, criando um novo ciclo, fechado, que não serviria de compensação para as florestas originais. Isso só seria atingido a partir do plantio e da conservação de novas florestas com espécies nativas, restabelecendo-se o estoque original, sem contar a biodiversidade e outros aspectos.

Caso diferente ocorreria se as florestas fossem plantadas em áreas onde jamais houve cobertura florestal. Nesse sentido, a madeira poderia ser considerada uma matéria-prima carbono-neutro.

Sendo assim, poderia se concluir que as emissões consideradas no Cenário 22, oriundas da queima da madeira no final da vida útil como dormente de ferrovia, representam, de fato, as emissões do desmatamento da floresta original, e não da floresta plantada. Como essa questão também envolve negociação entre países e diversas metodologias para contabilizar as emissões históricas, ela merece uma análise mais profunda para ser considerada na Avaliação do Ciclo de Vida dos dormentes de ferrovia.

Emissões no aterro

Nos cenários, nos quais está sendo considerada a disposição final no aterro sanitário dos dormentes no final do tempo de uso nas ferrovias, foram utilizados os valores *default* para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa, disponibilizados pelo

Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCCa, 2006), como detalhado no Anexo 5.

No entanto, se fossem realizadas medições *in-loco* nos aterros sanitários brasileiros e alemães para esta tese, poderiam ser encontrados outros resultados. Segundo BAHN *et al.* (2006), desde 2005 faz-se em alguns aterros sanitários na Alemanha o tratamento mecânico-biológico de resíduos que aumenta a oxidação do metano e, conseqüentemente, reduz a emissão total de gases de efeito estufa do aterro. O trabalho menciona que a taxa de oxidação do metano em aterros como esse tipo de tratamento são obtidas na faixa de 40% a 80%.

Supondo, então, a taxa de oxidação de 40% para os Cenários 7, 12, 19 e 24, as emissões de gases de efeito estufa seriam reduzidas consideravelmente. No Cenário 7 as emissões passariam de 438 kgCO₂e para 318 kgCO₂e (diferença de 120 kgCO₂e). No Cenário 19 as emissões seriam reduzidas em 112 kgCO₂e, passando de 458 kgCO₂e para 346 kgCO₂e. No Cenário 12, a redução seria ainda maior, de 300 kgCO₂e, reduzindo de 1.095 kgCO₂e para 795 kgCO₂e. Finalmente, no Cenário 24, a redução seria de 187 kgCO₂e, diminuindo de 765 kgCO₂e para 578 kgCO₂e.

Sendo assim, nota-se o impacto significativo na emissão de metano dependendo da tecnologia empregada no aterro sanitário.

Dificuldade na elaboração do estudo de ACV

A idéia inicial era elaborar um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida para os dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica, no Brasil e na Alemanha. Mas com as dificuldades encontradas para identificar o impacto de determinadas emissões, como as inseridas no item “outras emissões” (que generaliza os gases que estão presentes na exaustão, mas que não foi possível definir ao certo a sua composição separadamente) e do carbono-14 (que ocorrem durante o processo de geração de energia nas usinas nucleares), não foi possível realizar, na sua totalidade, a quarta fase do estudo de ACV. Diante disso, as análises foram feitas focando as emissões de gases de efeito estufa dos dormentes de ferrovia nos dois países.

Vale lembrar também que o estudo encontrou dificuldades para a aquisição dos Inventários do Ciclo de Vida de determinados parâmetros no estudo brasileiro, o que acarretou em considerações e adaptações para a elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes ferroviários.

6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Esse capítulo da tese foi dividido em duas partes: na primeira são apresentadas as conclusões com base nos objetivos da tese; e na segunda, são feitas sugestões para trabalhos futuros.

Suprimento de resíduos plásticos para produção de dormentes

Primeiramente, verificou-se que os resíduos plásticos disponíveis (i.e. que são destinados a aterros sanitários) em ambos os países poderiam atender, ao menos em parte, à demanda anual para a fabricação de dormentes de ferrovia.

No Brasil, o material disponível de polietileno de alta densidade pós-consumo em 2005 chegava a 283 mil toneladas, representando quantidade suficiente para atender 71% da demanda anual por dormentes fabricados com madeira natural que poderiam ser substituídos pelos de madeira plástica. E esse número tende a aumentar. Como visto, a previsão é de que o consumo de plástico *per capita* anual da América Latina aumente nos próximos anos, representando também um potencial de geração de matéria-prima pós-consumo disponível.

Esse potencial também poderia ser maior se o sistema de separação e de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos atendesse a toda a população brasileira.

Já na Alemanha, o potencial disponível, de 317 mil toneladas de PEAD (2005), seria suficiente para atender toda a demanda deste material para fabricação de dormentes de ferrovia de madeira plástica e os dados de 2005 apontam um aumento no consumo anual *per capita* de plástico, contribuindo para elevar ainda mais esse potencial.

Porém, a tendência é que esses materiais sejam destinados cada vez mais para a reciclagem energética, que paga mais pelo resíduo plástico (a Alemanha até importa resíduos de outros países europeus).

A comparação entre dois países, um desenvolvido e outro em desenvolvimento, permitiu, ainda, um maior conhecimento de como cada um deles trata as questões ambientais apresentadas na tese, servindo como exemplo para adaptações e troca de experiências e de idéias para os temas abordados.

Nesse sentido, verificou-se que o mercado de materiais reciclados para produção de dormentes, como o de madeira plástica, embora incipiente no Brasil, aparenta ser promissor, impulsionado pelo momento favorável que as questões ambientais desfrutam do mercado. A reciclagem mecânica dos plásticos agrega valor a materiais que hoje são destinados aos aterros e aos lixões, aumentando o seu tempo de uso, e contribui para a geração de emprego e renda. Com isso, aumenta-se o tempo de operação dos aterros, ao reduzir o volume de lixo depositado, oferecendo uma alternativa ao corte de árvores e contribuindo para a conscientização pública com relação ao consumo da madeira amazônica.

Na Alemanha, observou-se que essa alternativa oferece uma sobrevida aos materiais já descartados, que em geral são queimados de qualquer forma ao final da sua vida útil. Ou seja, cria-se a possibilidade de o lixo plástico ser reaproveitado ao menos mais uma vez antes de ser queimado em incineradores com recuperação energética.

Avaliação do Ciclo de Vida

A aplicação da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida para elaboração de quatro inventários dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha possibilitou a análise comparativa do ciclo de vida desses dormentes.

Nesse sentido, a parceria firmada em 2008 com o instituto de pesquisa alemão *Fraunhofer – Institut Chemische Technologie* (ICT), que adquiriu a licença temporária do GaBi *software*, e a posterior aquisição da licença permanente pelo Instituto de Macromolécula Professora Eloisa Mano (IMA), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), foram fundamentais para a elaboração dos quatro Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes apresentados nesta tese.

A base de dados disponível no GaBi e as informações e os dados obtidos com as empresas consultadas e a literatura científica especializada, por sua vez, possibilitaram a elaboração dos processos específicos envolvidos no ciclo de vida dos dormentes.

Uma vez concluídos os inventários foi possível verificar as categorias de impacto ambiental selecionados para esta tese. A categoria “Aquecimento Global” foi definida como o foco do estudo.

A análise comparativa das emissões de gases de efeito estufa em cada unidade de processo dos inventários da produção dos 80 mil dormentes de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha permitiu constatar as etapas do ciclo de vida que mais contribuem para essa emissão. No caso dos dormentes de madeira natural no Brasil a serraria (29%) e a incineração da madeira ao final da sua vida útil (65%) são as principais responsáveis. Na Alemanha ocorre o mesmo, mas a contribuição da serraria é maior que no caso brasileiro (37%) e a da queima da madeira é menor (55%). No caso dos dormentes de madeira plástica, no Brasil a indústria de reciclagem é responsável por 96% das emissões de GEE ao longo de todo o ciclo de vida. Já na Alemanha, que considera a usina de incineração como destinação para esse material, a queima responde por 73% das emissões totais de GEE.

O total das emissões do ciclo de vida dos dormentes de madeira natural nos dois países apresentou valores bem próximos, sendo a diferença de 2.445 tCO₂e. No caso da madeira plástica, a diferença foi bem maior (cerca de 30.000 tCO₂e). Mais uma vez, isso se deve à queima dos dormentes no final da sua vida útil em incineradores para a produção de energia na Alemanha.

Na última fase da ACV foi realizada a Análise de Cenários, que possibilitou a verificação do impacto nas emissões de GEE do parâmetro “vida útil” dos dormentes e de diferentes suposições - como a consideração ou não da madeira natural como uma matéria-prima carbono-neutro e de diferentes destinos dos dormentes (incineração, reciclagem e aterro). Verificou-se que esses três itens, em especial, influenciam expressivamente nas emissões de GEEs, devendo ser levados em consideração na tomada de decisão do público-alvo deste estudo.

Uma das principais vantagens do uso da madeira plástica para a fabricação dos dormentes de ferrovia é a expectativa de prolongamento da sua vida útil e esse aumento influencia nas emissões totais de gases de efeito estufa calculados nos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes.

Com essas considerações, oito cenários brasileiros e nove cenários alemães indicaram a madeira plástica como a matéria-prima com menor emissão de gases de efeito estufa para fabricação dos dormentes de ferrovia nesses países analisados.

Além disso, a partir da Análise de Cenários foi possível identificar, para cada caso, o cenário mais otimista e o cenário mais pessimista em termos de emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, analisando os 12 cenários brasileiros para o dormente de

madeira natural, verifica-se que essas emissões podem variar de -58 kgCO₂e (Cenário 6) até 1.095 kgCO₂e (Cenário 12), apresentando o maior intervalo dentre os quatro casos do estudo em função da disposição final no aterro e da necessidade de 2,5 dormentes de madeira natural para um de madeira plástica. Na Alemanha, esses dormentes apresentaram um intervalo menor, variando entre -119 kgCO₂e (Cenário 18) e 765 kgCO₂e (Cenário 24). Por outro lado, o dormente de madeira plástica produzido no Brasil apresentou a menor variação, de 72 kgCO₂e (Cenários 5 e 6) a 383 kgCO₂e (Cenários 3, 4, 10 e 11), em função do potencial de emissão evitado em relação à rede elétrica. Na Alemanha, as emissões de GEE variam entre -138 kgCO₂e (Cenários 17 e 18) e 469 kgCO₂e (Cenários 15, 16, 22 e 23).

A partir dos resultados observados nesta tese, pode-se concluir que as vantagens e desvantagens de cada matéria-prima dependem das considerações assumidas e dos parâmetros adotados de acordo com a realidade de cada país e com a disponibilidade e aquisição dos dados. A partir da construção de diversos cenários, foi possível observar que o estudo de ACV depende de uma série de fatores que variam com o passar do tempo, como as informações e os dados disponibilizados no período de elaboração do ICV. Como visto as políticas de incentivo, o mercado e as tecnologias existentes e em desenvolvimento são alguns exemplos de fatores que influenciam os parâmetros e as fronteiras do sistema definidos para a elaboração dos Inventários do Ciclo de Vida dos dormentes.

Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas das linhas sugeridas de trabalhos futuros que podem estender os estudos apresentados nesta tese:

- Aprofundar o estudo do item “outras emissões”, identificando exatamente que emissões são essas e como impactam o meio ambiente. Assim, será possível analisar todos os impactos ambientais dos dormentes de madeira natural e de madeira plástica ao longo do ciclo de vida.
- Aplicar a ferramenta de Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) na elaboração de inventários que considerem os custos envolvidos no ciclo de vida dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha. Ou seja, realizar uma análise dos custos definidos dentro da fronteira do sistema econômico do ciclo de vida dos dormentes analisados nesta tese.

- Realizar uma análise comparativa de outros produtos fabricados a partir da madeira plástica para também verificar o seu potencial de redução de emissão para o meio ambiente, principalmente de gases de efeito estufa, que contribua com alternativas ao consumo da madeira proveniente da Floresta Amazônica.
- Realizar uma análise de incertezas com os dados de *output* do Inventário do Ciclo de Vida dos dormentes, sobretudo por causa das dificuldades de obtenção de inventários brasileiros que abordassem a mesma metodologia de cálculo dos ICVs disponibilizados no GaBi *software*.
- Aprofundar a discussão sobre a consideração ou não da madeira natural como uma matéria-prima carbono-neutro nos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida de produtos fabricados com madeira natural.
- Calcular as emissões de metano provenientes da decomposição da madeira nos aterros sanitários brasileiros e alemães com dados mais próximos da realidade ao invés dos valores *default* do IPCC.
- Elaborar propostas que, tendo em vista o sistema alemão de coleta dos resíduos plásticos apresentado nesta tese, possam adaptar ou tomar aquele sistema como ponto de partida para aumentar a coleta seletiva no Brasil. Ou seja, as entidades nacionais, tanto do setor público quanto privado, responsáveis pelos resíduos devem buscar aumentar a taxa de coleta seletiva no maior número possível de municípios brasileiros, enfrentando as dificuldades do país relacionadas à grande extensão territorial, ao elevado número de habitantes e às suas diversidades regionais (social, cultural, étnica, econômica etc.).

Referências Bibliográficas

ABIQUIM. Anuário da Indústria Química Brasileira 2006. Associação Brasileira da Indústria Química, São Paulo, Brasil, 2006.

ABNT 14040. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2009 (válida a partir de 21.06.2009).

ABNT 14044. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 2009 (válida a partir de 21.06.2009).

ABNT. Resíduos Sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Brasileira, ABNT NBR 10004:2004, 2 ed., Brasil, 2004.

ABNT. Dormente de Madeira – Requisitos e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Brasileira, ABNT NBR 7511:2005, 2 ed., Brasil, 2005.

ACV. Comunidade Avaliação do Ciclo de Vida. Disponível em <http://acv.ibict.br>. Acessado em janeiro 2009.

ALBERONI & ARRUDA. Contato feito diretamente com a empresa (instalação de dormentes de ferrovia). Alberoni & Arruda – Serviços de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

ALMEIDA, C. M. V. B., GIANNETTI, B. F., RIBEIRO, C. M. Avaliação do ciclo de vida (ACV): uma ferramenta importante da ecologia industrial, Revista de graduação de engenharia química, São Paulo, v. 11, n. jan-jun, pp. 13-22, 2003.

ALMEIDA, S.C.A., FRANCHINI, R. Análise do Consumo Energético e de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Veículos Leves, In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT, Curitiba, Brasil, 2006.

ANPF. 150 Anos da Central do Brasil. Associação Nacional de Preservação Ferroviária, 2008.

ANTF. Glossário Ferroviário. Associação Ferroviária dos Transportes Ferroviários. Disponível em www.antf.org.br. Acessado em março 2009.

ASSAD, N.M.J. Dormentes de Plástico Reciclado. 3 ed. Revista e Ampliada, Gráfica Unicop, 2007.

ASTM. Book of ASTM Standards, American Society for Testing Materials.

- a) ASTM D 6108 (1997) – Compressive properties;
- b) ASTM D 6109 (1997) – Flexural Properties;
- c) ASTM D 6341 (1998) – Coefficient of Thermal Expansion;
- d) ASTM D 6662 (2001) - Standard specification for polyolefin-based plastic lumber decking boards.

AXION. Railroad crossties. Axion International. Disponível em www.axionintl.com/products/railroad-crossties.php. Acessado em março 2009.

BAIRD, C. Química Ambiental. 2 ed., Bookman, Porto Alegre, 622p, 2002.

BAHR, T., FRICKE, K., HILLEBRECHT, K., KÖLSCH, F., REINHARD, B. Clean Development Mechanism - Tratamento de Resíduos Sólidos e Oxidação de Gás Metano para Minimização de Emissões. Traduzido em português pela Web-resol. Technische Universität Braunschweig, Alemanha, 2006.

BALLARIN, A.W.; COLENCI, R.A.; PALMA, H.A.L. Durômetro Portátil para Madeiras. In: II Congresso Latinoamericano IUFRO, Anais do II Congresso Latinoamericano IUFRO, Santiago, Chile, 2006.

BASTOS, P.S.S. Análise Experimental de Dormentes de Concreto Protendido Reforçados com Fibras de Aço. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 1999.

BAYER. German premiere for polyurethane railway ties in the Leverkusen CHEMPARK. Bayer MaterialScience. News Release, 2008.

BEN. Balanço Energético Nacional 2006 – ano base 2005. Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, Brasil, 2006.

BGBI. Regulamento sobre os requisitos para a reciclagem e a eliminação dos resíduos de madeira (em alemão - Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz). Lei Federal publicada no Diário Oficial Alemão (em alemão - Das deutsche Bundesgesetzblatt - BGBI) Nr. 48, S. 2298, no dia 01/02/2007.

BMU. Waste Management in Germany. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Public Relations Division, Germany, 2006.

BONENTE, L.A.I.D.M., DAVID, R.K., DAVID, E.G. Transformação de Pneus Inservíveis em Dormente Ferroviário: Proposta de Pesquisa Tecnológica. Laboratório de Estudos e Simulação de Sistemas Metro-Ferroviários COPPE-UFRJ. Brasil, 2006.

BORGES, F.J. Inventário do Ciclo de Vida do PVC. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BRINA, H.L. Estradas de Ferro. Livros Técnicos e Científicos Editora SA, Rio de Janeiro, Brasil, 1983.

BVSDE. Virtual Library of Sustainable Development and Environmental Health. Panamerican Health Organization. Disponível em www.cepis.ops-oms.org/sde/ops-sde/bvsdeeng.shtml. Acessado em junho 2008.

CEMPRE. Pesquisa CicloSoft 2008. Disponível em www.cempre.org.br/ciclossoft_2008.php. Acessado em junho 2008.

CHATTREE, R., MANOHARAN, S., SATYANARAYANA. Composite sleepers for bridges – Progress Till Date and Road Ahead. Indian Railways Institute of Civil Engineering, Índia, 2007.

CHEHEBE, J.R.B. Análise do Ciclo de Vida de Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000. 1. ed., Ed. Qualitymark, CNI, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

CHEN, T.-C., LIN, C.-F. Greenhouse gases emissions from waste management practices using Life Cycle Inventory model, J. Hazard. Mater, doi:10.1016/j.jhazmat.2007.11.050, 2007.

CIC. Custom Market Research Study Reviewing the Potential for: Plastic Railroad Ties in Canada. CIC Innovation Consultants Inc. Custom Market Research Report on Plastic Railroad Ties for EPIC (Environmental and Plastics Industry Council), 2003.

CIWMB. Plastics White Paper Optimizing Plastics Use, Recycling, and Disposal in California, California Integrated Waste Management Board, State of California, United States, 2003.

CLIMENHAGE, D. Recycled Plastic Lumber: A strategic Assessment of its Production, Use and Future Prospects. A study sponsored by: the Environment and Plastics Industry Council (EPIC) and Corporations Supporting Recycling (CSR), 2003.

CM. Catálogo USPL - Dormente de Plástico Reciclado. Máquinas e Equipamentos para Ferrovia, Mineração e Siderurgia, 2008.

COLTRO, L., GARCIA, E.E., QUEIROZ, G.C. Life Cycle Inventory for Electric Energy System in Brazil, LCA Case Studies, The International Journal of LCA 8 (5), pp. 290 – 296, 2003.

COLTRO, L. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA) / Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), Campinas, Brasil, 2007.

CONPREM. Concreto Premoldado. Disponível em www.conprem.com.br/produtos/dormentes.htm. Acessado em julho 2008.

CONSULTIC. Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2005. Consultic Marketing & Industrieberatung, 2005.

DB. Baustellensituation 2007. Deutsche Bahn AG. GRB DB Netz AG. BR Report, n.4, 19 abril 2007.

de CAMPOS, ARAUJO, M.S., ROSA, L.P., Historical CO2 emission and concentrations due to land use change of croplands and pastures by country. Science of the Total Environmental, Vol. 346(1-3): 149-155, 2005.

Der Blaue Engel. Disponível em www.blauer-engel.de/en/index.php. Acessado em janeiro 2008.

DIN. Impregnation of wood railway sleepers with creosote (coal tar based oil) – DIN 688111. Norma alemã, 2007.

DGS. Background and Environmental and Health Issues, Outdoor Furnishings - Recycled Plastic Lumber. Green California - Department of General Services (DGS), California, Estados Unidos, 2008.

DORBRAS. Companhia Brasileira de Dormentes Dorbrás. Disponível em www.dorbras.com.br/produtos.html. Acessado em agosto 2008.

DSD. Establishment of the Dual System for Packaging Waste Recycling in Germany. Duales System Deutschland. Summary of the Practice. Germany, 2005

DSD. Duales System Deutschland. Disponível em www.gruener-punkt.de. Acessado em agosto 2008.

EARTHTRENDS. Forests, Grasslands, and Drylands – Germany. World Resources Institute, 2003.

ECHTLE. Contato feito diretamente com a empresa (serraria). Sägewerk Echtle, Baden-Württemberg, Alemanha, 2008.

ECOBILAN. Évaluation des impacts environnementaux des sacs de caisse Carrefour – Analyse du cycle de vie de sacs de caisse en plastique, papier et matériau biodégradable. França, 2004.

ECOINVENT. Disponível em www.ecoinvent.org/en. Acessado em janeiro 2009.

EEA. European Environment Agency, Europa. Disponível em www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C. Acessado em janeiro 2009.

EKOS. Links de Interesse, Instituto Ekos Brasil, Disponível em www.ekosbrasil.org/default.asp?site_Acao=mostraPagina&paginaId=159. Acessado em janeiro 2009.

ELCD. ELCD database v 1.0.1. European Commission, Joint Research Centre, LCA tools, service and data. Disponível em <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>. Acessado em fevereiro 2009.

EN. Railway applications – Track – Wood sleepers and beares – EN 13145:2001. Norma européia – versão em alemão, 2001.

EN. Derivatives from coal pyrolysis – Coal tar basead oils: creosotes – Specifications and test methods – EN 13991:2003. Norma européia – versão em inglês, 2003.

EP. Ecology Plastic. Disponível em www.ecologyplastic.com.br. Acessado em janeiro 2009.

EPA. Solid Waste Management and Greenhouse Gases – A life Cycle Assessment of Emissions and Sinks, Environmental Protection Agency, 3. ed., United States, 2006.

EPA. Software and Databases. Última atualização feita em novembro de 2008. Disponível em: www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/resources.html#Software. Acessado em fevereiro 2009.

EPE. Balanço Energético Nacional 2006 – ano base 2005. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Brasil, 2006.

EPE. Leilão A-3/2008 possibilita excedente estrutural de oferta de energia em 2011. Informe à Imprensa. Empresa de Pesquisa Energética. Brasil, 2008a.

EPE. Leilão A-5/2008 contrata 5.566 MW para atender o mercado nacional em 2013. Informe à Imprensa. Empresa de Pesquisa Energética. Brasil, 2008b.

ESMERALDO, F.A. Monitoramento dos Índices de Reciclagem Mecânica de Plástico no Brasil (IRmP). Plastivida Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos, 2008.

EU. Carbon Footprint - what it is and how to measure it. European Platform on Life Cycle Assessment European Commission. JRC, Institute for Environment and Sustainability, 2007.

FARIA, A.S. Utilização de Materiais Reciclados na Fabricação de Dormentes Ferroviários. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transporte. Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, Mestrado. Brasil, 2006.

FIB. Precast concrete railway track systems. State of art report. Bulletin 37. Fédération internationale du béton, 2006.

FRAUNHOFER. Railway Sleepers from Mixed Plastic Wastes – RailWaste. Relatório interno. Contato direto com a empresa. Fraunhofer - Institut Chemische Technologie (ICT), 2008.

FRUHBRODT, E. LCA Software Review – An up-to-date overview of the European market, Heidelberger Druckmaschinen AG, 2000.

GABI. Ganzheitliche Bilanzierung. Licença temporária de 6 meses do Fraunhofer ICT e do Instituto de Macromolécula da UFRJ do GaBi 4 Software-System, PE Europe GmbH e Stuttgart University, 2009. GaBi databases 2006:

- a) Lubricants at refinery – PE International.
- b) Gasoline at refinery – PE International.

- c) Diesel at refinery – PE International.
- d) Natural gas mix – PE International.
- e) Power grid mix - PE International.
- f) Thermal energy from natural gas – PE International.
- g) Truck 20-26 t total capacity / 17,3 t payload – PE International.
- h) RER - Wood (natural) in waste incinerator - ELCD / PE International.
- i) Wood (natural) in waste incinerator - PE International.
- j) Plastic packaging in municipal waste incinerator - PE International.

GARCIA, E.E., COLTRO, L., 2001, Reciclagem de Embalagens de PET no Brasil – Uma Visão Segundo a Metodologia de Análise de Ciclo de Vida – ACV, In: 6º Congresso Brasileiro de Polímeros, Gramado, Rio Grande do Sul: IQ/UFRGS, Brasil, pp. 1820-1823.

GDRC. The Global Development Research Centre, Japão. Disponível em www.gdrc.org/uem/eia/lca-japan.html. Acessado em janeiro 2009.

GLEISBAU. Flyer na InnoTrans - International Trade Fair for Transport Technology. Berlim, Alemanha, 2008.

GLOBONEWS. Fabricação de Madeira Plástica. Vídeo do Programa Cidade e Soluções, Globonews, 1º Julho 2007.

GOMES, M.S.P., ARAUJO, M.S.M. Bio-fuels production and the environmental indicators. Renewable Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2009.

GUSTAVSSON, L., SATHRE, R. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials, ed. Elsevier, Science Direct, Building and Environment 41, pp. 940–951, 2006.

HÖHNE *et al.* Contributions of individual countries' emissions to climate change and their uncertainty, *ad hoc* grupo sobre Modelagem e Avaliação das Contribuições para a Mudança do Clima, submetido, 2009.

IBGE. Perfil dos Municípios Brasileiros – 2006. Pesquisa de Informações Básicas Municipais. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2006.

IBGE. Contagem da população 2007. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2007.

IBGE. Área Territorial Oficial. Consulta por município. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008.

IMA. Instituto de Macromolécula Professora Eloisa Mano. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em www.ima.ufrr.br/linhaspes/frlinhpesg1.htm. Acessado em agosto 2008.

IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds), IGES, Japan, 2006.

IPCCa. Chapter 2: Waste Generation, Composition and Management Data. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006.

IPCC. Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: 2007 IPCC Fourth Assessment Report (AR4), Working Group 1 (WG1), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007.

INPE, 2005, Estimativas Anuais desde 1988. Disponível em: www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2005.htm. Acessado em abril 2007.

INPE. Amazônia absorve excesso de CO₂ da atmosfera - Estudo aponta que o saldo pode chegar a 5 toneladas anuais por hectare. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil, 2000. Disponível em <http://cienciahoje.uol.com.br/controlPanel/materia/view/2471>. Acessado em março 2009.

IPT. Índice IPT – Preço médio de madeira serrada bruta – 2006 (Valor em R\$/m³). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Brasil, 2006.

ISO 14040. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principal and Framework, International Organization for Standardization, ISO 14040, 1997.

ISO. International Organization for Standardization. Disponível em <http://www.iso.org/iso/home.htm>. Acessado em fevereiro 2009.

ITS. International Track Systems. Disponível em www.itsrailroadrubber.com/EcoProducts.html. Acessado em agosto 2008.

JAMES, K., GRANT, T. LCA of Degradable Plastic Bags, Centre for Design, 4th Australian LCA Conference, Sydney, Austrália, 2005.

JAKOB BECKER. Contato feito diretamente com a empresa (triagem de resíduos sólidos urbanos). Jakob Becker – Synergien für unsere Umwelt, Worms, Baden-Württemberg, Alemanha, 2008.

JUNGMEIER, G., WERNER, F., JARNEHAMMAR, A., HOHENTHAL, C., RICHTER, K. Allocation in LCA of Wood-based Products – Experiences of Cost Action E9, Wood-based Products, The International Journal of LCA, 7 (6), pp. 369 – 375, 2002.

KOHLER, M.; KÜNNIGER, T. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) from creosoted railroad ties and their relevance for life cycle assessment (LCA). Holz als Roh- und Werkstoff 61, 117-124, 2003.

KULAY, L. A. Uso da Análise de Ciclo de Vida para Comparação do Desempenho Ambiental das Rotas Úmida e Térmica da Produção de Fertilizantes Fosfatos. Tese de doutorado, Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

KÜNNIGER, T.; RICHTER, K. Ökologische Bewertung Von Eisenbahnschwellen in der Schweiz – Ecological assessment of railway sleepers consisting of prestressed concrete, sectional steel and creosote-treated beech. EMPA, 1998.

LAMPO, R.; NOSKER T. Development and Testing of Plastic Lumber Materials for Construction Applications. USACERL Technical Report 97/95. Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program, 1997.

LAMPO, R.; KRISHNASWAMY, P.; ROBBINS, A. Development of Industry Consensus Standards for Recycled-Plastic Lumber. U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2000.

LBP. Department Life Cycle Engineering, Universität Stuttgart. Disponível em www.ikpgabi.uni-stuttgart.de/english/index_e.html. Acessado em agosto 2008.

LEAP. User Guide, Long-range Energy Alternatives Planning System, Stockholm Environment Institute, Boston Center, Boston, United States, 2006.

LEITE, E.M.D. Dicionário Digital de Termos Médicos 2007. Hospital Universitário Onofre Lopes e Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Brasil, 2007.

LE MOS, H.M., BARROS, R.L.P. Ciclo de Vida dos Produtos, Certificação e Rotulagem Ambiental nas Pequenas e Médias Empresas, Comitê Brasileiro das Nações Unidas para o Meio Ambiente, patrocínio: SEBRAE, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

LMRI. Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante (Recomendações e definições). Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Designado pelo INMETRO IRD/CNEN/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

LUNDQUIST, L.; LETERRIER, Y.; SUNDERLAND, P.; MANSON, J.A.E. Life Cycle Engineering of Plastics – Technology, Economy and the Environment. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, Elsevier, 2000.

MARTINS, A.F., SUAREZ, J.C.M., MANO, E.B. Produtos Poliolefinicos Reciclados com Desempenho Superior aos Materiais Virgens Correspondentes. Artigo Técnico Científico. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 1999.

MCCONNELL, V.P. Composites Ride and Support teh Rails – Increased ridership and heavier axle loads on rail systems around the world a potential boon for composites. Composites Technology – Rail Transportation. Disponível em www.compositeworld.com. Acessado em março 2009.

MCDONOUGH, W., BRAUNGART, M. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. Douglas & McIntyre, Canadá, 2002.

MCDUGALL, F., WHITE, P., FRANKE, M., HINDLE, P. Integrated Solid Waste: a Life Cycle Inventory. 2nd Edition, Black Science, Reino Unido, 2001.

MCT. Fatores de Emissão de CO2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. Ministério de Ciência e Tecnologia, Brasil. Disponível em www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764.html. Acessado em março 2009. Fator médio de 2006.

MILOTA, M.R., WEST, C.D., HARTLEY, I.D. Softwood Lumber – Southeast Region, CORRIM: Phase I Final Report - Module C, Oregon State University, United States, 2004.

MMA. Amazônia Legal. Disponível em www.mma.gov.br. Acessado em março 2009.

MOURAD, A.L., GARCIA, E.E.C., VILHENA, A. Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Aplicações. Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA) / Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), Campinas, Brasil, 2002.

MRS. Contato feito diretamente com a empresa (setor ferroviário). MRS Logística, Juiz de Fora, Brasil, 2008.

MT. Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres – AETT 2007. 2.1.1 Extensão, em Quilômetros, das Linhas Principais e Ramais, por Estrada e Bitola - 2002-06. Agencia Nacional de Transportes Terrestres, Ministério dos Transportes, Brasil, 2007.

NEHLSSEN. Contato feito diretamente com a empresa (triagem de resíduos sólidos urbanos). Alemanha, 2008.

NETO, G.B.F., OLIVEIRA, A.G.P., COUTINHO, H.W.M., NOGUEIRA, M.F.M., RENDEIRO, G. Caracterização Energética de Biomassas Amazônicas. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. Disponível em <http://74.125.47.132/search?q=cache:tiwleJBMLicJ:paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/42.pdf+poder+calorifico+ma%C3%A7aranduba&cd=8&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Ano da publicação não divulgado. Acessado em março 2009.

NGR. Contato feito diretamente com a empresa (equipamentos para indústria de reciclagem). Next Generation Recyclingmachines, Áustria, 2008.

NOBRE. O Tictac do Clima no Planeta Terra. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasília, Brazil, 2008.

NOSKER, T., RENFREE, R. Developing a Recycling Plastic/Composite Railroad Tie. Plastic Engineering, 1999.

OEKO. Öko-Instituts. Disponível em <http://oeko.de/service/gemis/>. Acessado em março 2009.

PAC. Investimentos em Infra-Estrutura para o Desenvolvimento Econômico e Social. Programa de Aceleração do Crescimento. Portal do Governo Brasileiro. Disponível em www.brasil.gov.br/pac/conheca/infra_estrutura/. Acessado em março 2009.

PIRES, A.C. Proposta Preliminar do Projeto Brasileiro de Inventário do Ciclo de Vida para a Competitividade da Indústria Brasileira. In: Impacto da Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos para as Indústrias de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos, São Paulo, v. 1. p. 1-5, 2005.

PLASTICSEUROPE. The Compelling Facts About Plastics – An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe. Association of plastics manufactures, 2008.

PLASTIVIDA. Pesquisa - Elaboração e Monitoramento dos Índices de Reciclagem Mecânica dos Plásticos no Brasil. Plastivida Instituto Sócio-Ambiental dos Plásticos, Disponível em www.plastivida.org.br/reciclagem/pes_mercado04.htm. Acessado em junho 2008.

POLYSUM. PolySum Technologies. Disponível em www.polysum.com/index.htm. Acessado em agosto 2008.

PORTO, T.G. PTR 2501 – Ferrovias. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, 2004.

PRT. Performance Rail Tie. Disponível em www.plasticities.com/production.html. Acessado em agosto 2008.

RAILONE. Flyer in InnoTrans. Berlin, Germany, 2008.

RGF. Reciclando e Garantindo o Futuro. Disponível em <http://www.projetoqf.com/index2.html>. Acessado em agosto 2008.

RODRIGUES, C.; JORGE, C.; MONASTERIO, G.; SOARES, M.; MUNIZ, L.F.; SPADA, J.L.; SOUSA, C.J. Use of Alternative Sleepers in the MRS Heavy Haul Railroad. High Tech in Heavy Haul. IHHA, International Heavy Haul Association, Kiruna, Suécia, 2007.

ROSS, M., MARK, S. Stationarity of Global Per Capita Carbon Dioxide Emissions: Implications for Global Warming Scenarios, 2006.

RTI. Recycle Technologies International. Disponível em www.rti-railroad-tie.com. Acessado em agosto 2008.

RÜTGERS. Creosote - Preservative for industrial wood impregnation. Rütgers Chemicals, 2008.

SANFER. Disponível em www.sanfer.com.br. Sanfer Comercial Ltda. Acessado em abril 2007.

SARTORI, L., Avaliação Comparativa de Desempenho Ambiental de Duas Caixas de Carga de Semi-reboque Bitrem Graneleiro: Compósito Natural versus Compósito Sintético. Universidade de Caxias do Sul, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Programa de Pós-Graduação em Materiais, Brasil, 2007.

SCHEIBE, T. CFT-Sitzung zum Thema: Eisenbahngleisschwellen aus recyceltem Kunststoff. Apresentação do Deutsche Bahn AG – DB Mobility, Networks and Logistics, 2008.

SCHUT, J.H., They've Been Working on the Railroad. Plastics Technology, Gardner Publications, 2009.

SEPPÄLÄ, J., MELANEN, M., JOUTTIJARVI, T., et al. Forest industry and the environment: a life cycle assessment study from Finland, Ed. Elsevier, Resources, Conservation and Recycling 23, pp. 87–105, 1998.

SETTI, J.B. Ferrovias no Brasil – um século e meio de evolução. Memória do Trem, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

SILVA, G. A., KULAY, L. A. Panorama de ACV no Brasil. In: International Conference on Life Cycle Assessment - CILCA 2005, São José, Costa Rica. Proceedings of International Conference on Life Cycle Assessment - CILCA 2005, 2005.

SILVA, G. A., KULAY, L. A., RIBEIRO, F. M. Inventário do ciclo de vida de energia elétrica no Brasil. In: Armando Caldeira-Pires; Maria Carlota de Souza-Paula; Roberto C. Villas Bôas. (Org.). A Avaliação do Ciclo de Vida - A ISO 14040 na América Latina. Brasília: Associação Brasileira das Instituições de Pesquisa Tecnológica - ABIPTI, p. 180-204, 2005.

SONG, H.S., HYUN, J.C. A study on the comparison of the various waste management scenarios for PET bottles using the life-cycle assessment (LCA) methodology, Ed. Elsevier, Resources, Conservation and Recycling 27, pp. 267–284, 1999.

SPINACÉ, M.A.S.; DE PAOLI, M.A. A Tecnologia da Reciclagem de Polímeros. Química Nova, Vol. 28, No. 1, pp. 65-72, 2005.

SUPERVIA. Contato feito diretamente com a empresa (setor ferroviário). Supervia – Trens urbanos, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

THAREJA, A., VYAS, A., BANERJEE, P., et al. Environmental Friendly Building Materials – A Literature Survey, Integrated Building Design Project, International Institute of Information Technology, Hyderabad, Índia, ano não disponibilizado.

THYSSENKRUPP. Contato feito diretamente com a empresa (departamento responsável pelo desenvolvimento de dormente de aço). Alemanha, 2008.

TIETEK. TieTek Composite Crossties. Disponível em www.tietek.com. Acessado em agosto 2008.

UFSC. Grupo de Pesquisas em Avaliação do Ciclo de Vida da Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em www.ciclodevida.ufsc.br/acv. Acessado em fevereiro 2009.

UMBERTO. Disponível em www.umberto.de. Acessado em agosto 2008.

VALT, R.B.G. Ciclo de Vida de Embalagens para Bebidas no Brasil. Brasília, Thesaurus, 224 p., 2007.

VIGON, B. W., TOLLE, D. A., CORNARY, B. W., et al. Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles, Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, U.S, EPA/600/R-92/245, 1993.

WERNER, F., SCHRAEGLE, R., HALUPCZOK, U., et al. Ökobilanzstudie Langfassung. Vergleich von Schwellen aus Buchenholz, Eichenholz, Beton und Stahl. Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V, 2008.

WIKIPEDIA. Disponível em <http://pt.wikipedia.org>. Acessado em janeiro 2009.

WISEWOOD. Contato feito diretamente com a empresa (recicladora de plástico). Wisewood Soluções Ecológicas, Campinas, Brasil, 2008.

WOIDASKY, J. M. Plastic Recycling in Germany. "Seminário Internacional de Plástico: Recicle que dá certo - O Plástico - sua relação com o meio ambiente - Caminhos e estratégias". Organizado pela ARDEF e SINPLAST, Rio Grande do Sul, Brasil, 1999.

WÜLKNITZ. Contato feito diretamente com a empresa (impregnação de dormentes de ferrovia). Wülknit -Imprägnierwerk Wülknitz, Alemanha, 2008.

Anexos

Anexo 1 - Legendas dos sistemas de produto e das fronteiras dos sistemas de produto

Anexo 2 - Questionário para aquisição de dados junto às empresas consultadas

Anexo 3 - Janela do GaBi *software* do balanço dos quatro ICVs dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha

Anexo 4 – Os quatro Inventários do Ciclo de Vida elaborados no GaBi *software* para os 80 mil dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha

Anexo 5 – Explicação do cálculo da emissão do dióxido de carbono equivalente proveniente da decomposição do dormente de madeira disposto no aterro

ANEXO 1

Legendas dos sistemas de produto e das fronteiras dos sistemas de produto

Figura	Legenda e Banco de dados	Foto
	Diesel e gasolina – ICV do diesel e da gasolina produzidos na refinaria. <i>Inputs</i> (volume dos recursos consumidos desde a extração da matéria-prima até a produção na refinaria) e <i>outputs</i> (diesel e gasolina; e emissões para o ar, a água e o solo). Processos considerados do GaBi: Diesel at refinery – PE International, GaBi databases 2006. Gasoline at refinery – PE International, GaBi databases 2006.	Google - imagens
	Energia elétrica – ICV da rede elétrica brasileira e alemã. <i>Inputs</i> (volume dos recursos consumidos desde a extração da matéria-prima até a geração de energia elétrica) e <i>outputs</i> (energia elétrica; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo considerado do GaBi: Power grid mix - GaBi databases 2006.	Google – imagens
	Incineração – Queima da madeira natural / madeira plástica em incineradores para produção de energia. <i>Inputs</i> (volume de recursos consumidos na usina de incineração) e <i>outputs</i> (energia térmica; emissões para o ar e para o solo). Processos considerados do GaBi: Wood (natural) in waste incinerator - ELCD / PE International, GaBi databases 2006. Wood (natural) in waste incinerator - PE International, GaBi databases 2006. Plastic packaging in municipal waste incinerator - PE International, GaBi databases 2006.	Google – imagens
	Óleo lubrificante – ICV do óleo produzido na refinaria. <i>Inputs</i> (volume dos recursos consumidos desde a extração da matéria-prima até a produção na refinaria) e <i>outputs</i> (óleo lubrificante; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo considerado do GaBi: Lubricants at refinery – PE International, GaBi databases 2006.	Google – imagens

	Empilhadeira – Diesel consumido pelos caminhões. <i>Inputs</i> (volume do diesel consumido e peso do material transportado) e <i>outputs</i> (peso do material transportado; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo considerado do GaBi: Solo truck up to 7,5 t total capacity / 3,3 t payload (short-distance) / Global – PE International, GaBi databases 2006.	Google – imagens
	Floresta – Corte da madeira na floresta. <i>Inputs</i> (volume dos recursos energéticos consumidos) e <i>outputs</i> (peso total das toras de madeira; e emissões para o ar). Processo elaborado pelo estudo.	Google – imagens
	Caminhão – Diesel consumido pelos caminhões. <i>Inputs</i> (volume do diesel consumido e peso do material transportado) e <i>outputs</i> (peso do material transportado; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo considerado do GaBi: Truck 20-26 t total capacity / 17,3 t payload / Global – PE International, GaBi databases 2006.	GaBi 4 software
	Serraria – Produção de madeiras serradas (BR) / dos dormentes de madeira natural (DE). <i>Inputs</i> (peso total das toras de madeira, quantidade de energia elétrica e o volume dos recursos consumidos na serraria) e <i>outputs</i> (peso total das madeiras serradas / dos dormentes de madeira natural; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo elaborado pelo estudo.	Ana Claudia Nioac de Salles
BR:  e para DE: Natural gas mix	Gás natural – ICV da produção e transporte do gás natural. <i>Inputs</i> (volume dos recursos consumidos desde a extração da matéria-prima até a produção) e <i>outputs</i> (gás natural; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo considerado do GaBi: Natural gas mix – PE International, GaBi databases 2006.	Ana Claudia Nioac de Salles
DE: Thermal energy from natural gas PE	Gás natural – Geração de energia térmica a partir da queima do gás natural na indústria de reciclagem. <i>Inputs</i> (volume de gás natural consumido na indústria de reciclagem) e <i>outputs</i> (energia térmica; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo considerado do GaBi: DE: Thermal energy from natural gas PE – PE	GaBi 4 software

	International, GaBi databases 2006.	
	Uso do produto - Ferrovia com dormente de madeira natural. <i>Inputs</i> e <i>outputs</i> (peso total dos dormentes de madeira natural). Fluxo de material. Processo elaborado pelo estudo.	Supervia
	Uso do produto -Ferrovia com dormente de madeira plástica. <i>Inputs</i> e <i>outputs</i> (peso total dos dormentes de madeira plástica). Fluxo de material. Processo elaborado pelo estudo.	Supervia
BR: Indústria de transformação	Indústria – Produção dos dormentes de madeira natural. <i>Inputs</i> (peso total das madeiras serradas, quantidade de energia elétrica e volume dos recursos consumidos na indústria) e <i>outputs</i> (peso total dos dormentes de madeira natural; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo elaborado pelo estudo.	GaBi 4 software
BR: Wood for incineration	Destinação final: Madeira destinada para incineração. <i>Inputs</i> e <i>outputs</i> (peso total das madeiras). Fluxo de material. Processo elaborado pelo estudo.	GaBi 4 software
BR: Cooperativa	Cooperativa – Separação dos resíduos sólidos urbanos. <i>Inputs</i> (peso total dos resíduos sólidos coletados, quantidade de energia elétrica e o volume dos recursos consumidos na cooperativa) e <i>outputs</i> (peso total dos fardos de plástico; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo elaborado pelo estudo.	GaBi 4 software
DE: Planta de triagem	Triagem – Separação dos resíduos sólidos urbanos. <i>Inputs</i> (peso total dos resíduos sólidos coletados, quantidade de energia elétrica e o volume dos recursos consumidos pela planta de triagem) e <i>outputs</i> (peso total dos fardos de plástico; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo elaborado pelo estudo.	GaBi 4 software
BR: Indústria de reciclagem DE: Indústria de reciclagem	Reciclagem – Produção dos dormentes de madeira plástica a partir da reciclagem dos materiais descartados. <i>Inputs</i> (peso dos materiais, quantidade de energia elétrica e o volume dos recursos consumidos na indústria de reciclagem) e <i>outputs</i> (peso total dos dormentes de madeira plástica; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo elaborado pelo estudo.	GaBi 4 software
DE: Indústria de impregnação	Impregnação – aplicação do creosoto no dormente de madeira natural. <i>Inputs</i> (peso dos materiais, quantidade de energia elétrica e o volume dos recursos e do creosoto consumidos na indústria de impregnação) e	GaBi 4 software

	<i>outputs</i> (peso total dos dormentes de madeira plástica; e emissões para o ar, a água e o solo). Processo elaborado pelo estudo.	
DE: Fabricação do creosoto	Creosoto – Como somente foi encontrado na bibliografia especializada o consumo de energia elétrica para a sua fabricação, apenas esse parâmetro foi considerado como dado de <i>input</i>. <i>Inputs</i> (quantidade de energia elétrica consumida); <i>outputs</i> (volume de creosoto). Processo elaborado pelo estudo.	GaBi 4 software
DE: Incineração do creosoto	Destinação final – queima do creosoto em incineradores para geração de energia. <i>Inputs</i> (volume do creosoto e de recursos consumidos na usina de incineração) e <i>outputs</i> (energia térmica; emissões para o ar e para o solo). Processo elaborado pelo estudo.	GaBi 4 software
	Logo - Sistema de coleta e tratamento dos resíduos na Alemanha - <i>Dual System Deutschland</i>	Der Grüne Punkt

Observação: BR - Brasil e DE - Alemanha.

ANEXO 2

Questionário para aquisição de dados junto às empresas consultadas

- Nome da empresa:
- Nome do responsável:
- Contatos:
- Atividade principal da empresa:
- Produto/Serviço:
- Distância percorrida até a próxima etapa:
- Tipo de transporte até a próxima etapa:
- Comentários:

Entradas (recursos materiais e naturais renováveis e não-renováveis)			Saídas (produtos, resíduos sólidos e efluentes líquidos)		
Recurso	Quantidade	Unidade	Recurso	Quantidade	Unidade
Energia elétrica		MWh	Produto		tonelada
Óleo diesel		litros	Óleo residual		litros
Gás natural		m ³	Cinzas		kg
Água		m ³	Lodo		m ³
			Emissões		kg

ANEXO 3

Janela do GaBi software do balanço dos quatro ICVs dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha

1) Dormente de madeira natural no Brasil

Inputs	
Flows	1,572E005
Resources	1,572E005
Energy resources	1120,6
Material resources	1,5608E005

Outputs	
Flows	1,712E005
Resources	48390
Emissions to air	1,2278E005
Emissions to fresh water	12,364
Emissions to sea water	21,701
Emissions to industrial soil	0,2103

2) Dormente de madeira plástica no Brasil

Inputs	
Flows	68960
Resources	68960
Energy resources	1662
Material resources	67298

Outputs	
Flows	71386
Resources	41065
Emissions to air	30303
Emissions to fresh water	12,926
Emissions to sea water	3,8564
Emissions to industrial soil	0,31316

3) Dormente de madeira natural na Alemanha

Alemanha_ Dormente de madeira natural [Balances] -- Balance

Object Edit View Tools Help

Name: Alemanha_ Dormente de madeira natural Rows: 2 Columns: 1

Quantity Evaluation ☐ Quantity view Unit Normalization ☒ In/out aggregation Absolute values

Mass [kg] t not filtered

LCA LCC LCWT

Inputs ☒ Just elementary flows ☒ separate IO tables Diagram -

	Alemanha: Do
Flows	2,898E005
Resources	2,898E005
Others	

Outputs Diagram -

	Alemanha: Do
Flows	2,4666E005
Resources	78742
Others	
Emissions to air	1,6778E005
Emissions to fresh water	120,16
Emissions to sea water	19,312
Emissions to industrial soil	0,2026

System: Changed. Last change: System, 16/03/2009 21:03:12

4) Dormente de madeira plástica na Alemanha

Alemanha_ Dormente de madeira plástica [Balances] -- Balance

Object Edit View Tools Help

Name: Alemanha_ Dormente de madeira plástica Rows: 2 Columns: 1

Quantity Evaluation ☐ Quantity view Unit Normalization ☒ In/out aggregation Absolute values

Mass [kg] t not filtered

LCA LCC LCWT

Inputs ☒ Just elementary flows ☒ separate IO tables Diagram -

	Alemanha: Do
Flows	4,2494E005
Resources	4,2494E005
Others	

Outputs Diagram -

	Alemanha: Do
Flows	3,6562E005
Resources	83824
Emissions to air	2,8166E005
Emissions to fresh water	126,84
Emissions to sea water	10,948
Emissions to industrial soil	0,13012

System: Changed. Last change: System, 16/03/2009 21:07:25

ANEXO 4

Os quatro Inventários do Ciclo de Vida elaborados no GaBi software para os 80 mil dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha

(em tonelada)	Brasil: Dormente de madeira natural	Brasil: Dormente de madeira plástica	Alemanha: Dormente de madeira natural	Alemanha: Dormente de madeira plástica
INPUTS				
RESOURCES	1,57E+05	6,90E+04	2,90E+05	4,25E+05
ENERGY RESOURCES	1,12E+03	1,66E+03	6,33E+03	6,61E+03
Non renewable energy resources	1,12E+03	1,66E+03	6,33E+03	6,61E+03
Crude oil (resource)	7,22E+02	1,85E+02	6,02E+02	3,55E+02
Hard coal (resource)	1,65E+02	1,40E+02	1,26E+03	1,41E+03
Lignite (resource)	2,21E+01	2,09E+01	4,02E+03	4,43E+03
Natural gas (resource)	2,11E+02	1,32E+03	4,42E+02	4,18E+02
Uranium (resource)	1,41E-02	1,20E-02	1,06E-01	1,14E-01
Renewable energy resources	3,68E-02	3,41E-02	8,18E-02	8,69E-02
MATERIAL RESOURCES	1,56E+05	6,73E+04	2,83E+05	4,18E+05
Non renewable elements	5,38E-06	9,06E-07	7,61E-06	1,11E-05

Iron	4,40E-06	2,05E-08	4,60E-06	7,30E-08
Lead	3,09E-14	1,80E-14	1,15E-13	1,22E-13
Sulphur	9,72E-07	8,85E-07	3,01E-06	1,10E-05
Non renewable resources	1,83E+03	1,68E+03	5,31E+04	6,08E+04
Barium sulphate	3,17E-12	1,84E-12	1,18E-11	1,25E-11
Basalt	4,42E-02	3,05E-02	7,72E-02	8,18E-02
Bauxite	1,63E-01	1,42E-01	7,97E-02	8,42E-02
Bentonite	1,41E+00	3,61E+00	1,87E+00	1,30E+00
Calcium chloride	3,25E-10	1,89E-10	1,21E-09	1,28E-09
Chromium ore	8,14E-02	6,92E-02	5,05E-02	5,38E-02
Clay	2,05E+00	2,09E+00	6,76E-01	5,54E-01
Colemanite ore	8,49E-05	7,85E-05	1,02E-02	1,09E-02
Copper - Gold - Silver - ore (1,0% Cu; 0,4 g/t Au; 66 g/t Ag)	5,61E-01	4,77E-01	3,43E-02	3,67E-02
Copper - Gold - Silver - ore (1,1% Cu; 0,01 g/t Au; 2,86 g/t Ag)	3,42E-01	2,91E-01	2,09E-02	2,23E-02
Copper - Gold - Silver - ore (1,16% Cu; 0,002 g/t Au; 1,06 g/t Ag)	1,93E-01	1,64E-01	1,18E-02	1,26E-02
Copper - Molybdenum - Gold - Silver - ore (1,13% Cu; 0,02% Mo; 0,01 g/t Au; 2,86 g/t Ag)	4,70E-01	4,00E-01	2,88E-02	3,07E-02
Copper ore (0.14%)	4,74E-01	4,03E-01	1,91E+00	2,04E+00
Copper ore (1.2%)	5,82E-02	4,95E-02	3,56E-03	3,80E-03
Copper ore (4%)	2,71E-11	2,40E-11	3,35E-12	3,33E-12
Copper ore (sulphidic)	3,21E-08	2,85E-08	3,97E-09	3,95E-09
Dolomite	2,65E-05	2,35E-05	3,97E-04	4,23E-04
Ferro manganese	1,55E-14	8,98E-15	5,75E-14	6,12E-14
Fluorspar (calcium fluoride; fluorite)	1,01E-03	8,63E-04	6,18E-04	6,59E-04

Gypsum (natural gypsum)	1,24E+00	1,15E+00	2,56E-01	2,49E-01
Heavy spar (barytes)	3,26E+00	8,61E+00	4,53E+00	3,40E+00
Inert rock	1,45E+03	1,36E+03	5,28E+04	5,76E+04
Iron ore	2,95E+00	4,45E+00	2,92E+00	4,69E+00
Iron ore (65%)	2,38E-03	1,87E-03	9,19E-03	8,23E-02
Kaolin ore	1,32E-04	1,23E-04	1,83E-02	1,95E-02
Lead - zinc ore (4.6%-0.6%)	2,86E-01	7,13E-01	3,72E-01	2,58E-01
Limestone (calcium carbonate)	6,78E+01	5,07E+01	2,29E+02	2,41E+03
Magnesit (Magnesium carbonate)	3,47E-05	3,14E-05	5,39E-06	5,27E-06
Magnesium chloride leach (40%)	6,67E+00	1,40E-01	1,76E+01	4,91E+02
Manganese ore	1,74E-02	1,48E-02	9,72E-03	1,04E-02
Manganese ore (R.O.M.)	3,56E-02	4,87E-02	1,51E-02	1,06E-02
Molybdenite (Mo 0,24%)	2,87E-01	2,44E-01	1,76E-02	1,88E-02
Natural Aggregate	2,39E+02	2,06E+02	4,08E+01	4,36E+01
Nickel ore	2,36E-07	2,19E-07	2,82E-05	3,01E-05
Nickel ore (1.6%)	2,51E-01	2,79E-01	6,32E-02	4,82E-02
Olivine	1,70E-13	9,88E-14	6,32E-13	6,73E-13
Peat	1,16E-02	4,84E-03	2,87E-03	2,24E-03
Phosphate ore	1,99E-05	3,34E-05	2,42E-05	1,52E-05
Phosphorus minerals	7,74E-05	6,76E-05	8,46E-06	8,53E-06
Phosphorus ore (29% P2O5)	1,33E-07	0,00E+00	1,25E-07	1,59E-07
Potassium chloride	1,67E-05	1,51E-05	3,02E-06	2,97E-06
Precious metal ore (R.O.M)	1,37E-02	1,16E-02	8,29E-04	9,07E-04

Quartz sand (silica sand; silicon dioxide)	4,23E-01	6,73E-01	5,47E-01	3,77E-01
Raw pumice	1,27E-05	1,19E-05	1,77E-03	1,89E-03
Slate	2,86E-13	1,66E-13	1,06E-12	1,13E-12
Sodium chloride (rock salt)	4,54E+00	1,59E-02	4,57E+00	6,20E+00
Sodium sulphate	1,55E-04	1,81E-07	1,45E-04	2,02E-04
Soil	4,46E+01	3,77E+01	1,30E+01	1,82E+02
Sulphur (bonded)	4,78E-07	4,37E-07	1,55E-06	5,68E-06
Talc	1,64E-05	1,49E-05	3,06E-04	3,27E-04
Tin ore	2,75E-13	1,60E-13	1,02E-12	1,09E-12
Titanium ore	8,61E-02	8,00E-02	2,58E-02	2,59E-02
Zinc - copper ore (4.07%-2.59%)	2,01E-01	2,49E-01	1,77E-01	1,66E-01
Zinc - lead - copper ore (12%-3%-2%)	1,31E-01	1,44E-01	9,62E-02	9,30E-02
Zinc - lead ore (4.21%-4.96%)	9,24E-12	8,19E-12	1,14E-12	1,14E-12
Zinc ore (sulphide)	3,15E-10	2,68E-10	7,63E-11	9,75E-10
Renewable resources	1,54E+05	6,56E+04	2,30E+05	3,58E+05
Water	6,62E+04	4,48E+04	1,14E+05	1,43E+05
Air	8,75E+04	2,03E+04	1,16E+05	2,14E+05
Carbon dioxide	6,06E+02	5,15E+02	2,18E+01	2,32E+01
Nitrogen	3,06E-07	2,98E-07	9,34E-06	9,96E-06
OUTPUTS				
RESOURCES	4,84E+04	4,11E+07	7,87E+07	8,38E+04
Non renewable elements	0,00E+00	0,00E+00	6,13E+02	0,00E+00

Manganese	0,00E+00	0,00E+00	3,48E+00	0,00E+00
Potassium	0,00E+00	0,00E+00	5,77E+02	0,00E+00
Sodium	0,00E+00	0,00E+00	3,20E+01	0,00E+00
Renewable resources	4,84E+04	4,11E+07	7,87E+07	8,38E+04
Water	4,79E+04	4,07E+07	7,87E+07	8,38E+04
Oxygen	4,53E+02	3,85E+05	1,33E+04	1,42E+01
EMISSIONS TO AIR	1,23E+05	3,03E+04	1,68E+05	2,82E+05
Heavy metals	3,62E-02	3,01E-02	4,93E-02	7,25E-02
Antimony	3,65E-05	3,10E-05	5,05E-05	6,13E-02
Arsenic (+V)	3,39E-04	2,87E-04	2,90E-04	3,10E-04
Arsenic trioxide	1,97E-10	4,91E-10	2,59E-10	1,80E-10
Cadmium (+II)	3,15E-05	2,61E-05	1,11E-04	2,95E-05
Chromium (+III)	9,64E-07	8,96E-07	1,20E-02	1,92E-07
Chromium (unspecified)	6,92E-04	5,82E-04	3,42E-03	1,40E-04
Cobalt	1,04E-04	8,24E-05	4,52E-05	4,35E-05
Copper (+II)	4,24E-04	3,55E-04	2,23E-04	2,36E-04
Heavy metals to air (unspecified)	3,34E-08	3,34E-08	4,02E-06	4,29E-06
Hydrogen arsenic (arsine)	1,64E-08	4,07E-08	2,15E-08	1,50E-08
Iron	7,60E-05	2,08E-05	8,34E-05	1,07E-04
Lanthanides	2,41E-09	2,20E-09	1,13E-08	4,76E-08
Lead (+II)	7,18E-04	6,10E-04	2,41E-03	3,64E-03
Manganese (+II)	1,63E-04	1,09E-04	1,28E-02	8,97E-04

Mercury (+II)	1,18E-05	9,33E-06	1,79E-04	1,92E-04
Molybdenum	5,73E-06	1,45E-06	5,04E-06	2,90E-06
Nickel (+II)	6,20E-03	5,22E-03	1,10E-03	2,23E-04
Palladium	8,99E-15	5,22E-15	3,34E-14	3,55E-14
Rhodium	8,67E-15	5,04E-15	3,22E-14	3,43E-14
Selenium	3,52E-04	2,95E-04	9,89E-04	1,06E-03
Silver	2,65E-12	2,25E-12	1,48E-13	1,57E-13
Tellurium	1,29E-07	1,19E-07	2,63E-08	2,56E-08
Thallium	6,93E-07	6,61E-07	2,09E-07	2,54E-07
Tin (+IV)	1,32E-04	1,11E-04	3,03E-04	3,23E-04
Titanium	1,43E-07	1,27E-07	8,10E-07	3,23E-06
Vanadium (+III)	2,34E-02	1,94E-02	1,15E-03	8,80E-04
Zinc (+II)	3,48E-03	2,95E-03	1,41E-02	3,17E-03
Inorganic emissions	2,80E+04	1,28E+04	5,00E+04	6,33E+04
Ammonia	2,98E-01	7,69E-03	1,16E+00	6,87E-01
Ammonium	1,89E-09	1,69E-09	2,46E-07	2,63E-07
Ammonium nitrate	2,81E-09	2,57E-09	9,09E-09	3,34E-08
Barium	2,64E-03	5,91E-03	4,64E-03	4,05E-03
Beryllium	1,48E-05	1,26E-05	5,90E-06	6,31E-06
Boron compounds (unspecified)	1,17E-03	9,93E-04	2,03E-02	2,18E-02
Bromine	1,06E-03	8,98E-04	1,49E-02	5,09E-03
Carbon dioxide	2,28E+04	7,39E+03	2,49E+04	3,62E+04
Carbon disulphide	2,53E-08	2,16E-08	1,07E-07	1,14E-07

Carbon monoxide	9,11E+00	5,59E+00	3,96E+00	2,93E+00
Chloride (unspecified)	1,02E-03	2,99E-04	6,80E-04	3,78E-04
Chlorine	9,57E-06	4,93E-08	3,04E-02	1,29E-05
Cyanide (unspecified)	2,27E-05	6,32E-06	1,65E-05	9,09E-06
Fluoride (unspecified)	3,61E-04	3,07E-04	2,72E-03	2,92E-03
Fluorides	5,27E-04	1,64E-04	3,38E-04	1,87E-04
Fluorine	5,46E-08	4,91E-08	7,28E-03	4,45E-07
Helium	1,87E-05	1,42E-05	6,04E-05	7,07E-04
Hydrogen	1,22E-03	1,65E-03	2,91E-03	2,43E-03
Hydrogen bromine (hydrobromic acid)	1,92E-07	2,58E-07	3,89E-05	4,15E-05
Hydrogen chloride	1,10E-01	8,94E-02	8,41E-02	2,67E+00
Hydrogen cyanide (prussic acid)	7,00E-07	4,80E-07	1,58E-06	3,82E-05
Hydrogen fluoride	1,20E-02	1,02E-02	1,93E-02	2,08E-02
Hydrogen iodide	2,01E-10	1,93E-10	4,29E-08	4,58E-08
Hydrogen phosphorous	2,12E-08	1,81E-08	2,00E-09	2,13E-09
Hydrogen sulphide	5,00E-03	6,22E-03	1,11E-02	3,08E-02
Lead dioxide	2,77E-08	2,35E-08	1,54E-09	1,64E-09
Magnesium	0,00E+00	0,00E+00	6,07E-02	4,87E-01
Nitrogen (atmospheric nitrogen)	1,55E-01	3,73E-01	4,94E-01	1,91E-09
Nitrogen dioxide	2,92E-08	2,48E-08	7,05E+00	5,31E-08
Nitrogen monoxide	4,82E-07	4,24E-07	5,42E-08	1,08E+01
Nitrogen oxides	1,78E+01	6,58E+00	1,92E+01	1,59E+00
Nitrous oxide (laughing gas)	6,47E-01	5,02E-02	8,98E-01	3,20E+00

Oxygen	1,38E+00	1,19E+00	3,03E+00	2,42E-08
Phosphorus	0,00E+00	0,00E+00	5,05E-02	2,71E+04
Scandium	1,23E-09	1,12E-09	5,07E-09	8,88E-07
Steam	5,08E+03	5,33E+03	2,51E+04	1,17E+01
Strontium	4,66E-08	4,26E-08	2,06E-07	1,12E-07
Sulphur dioxide	1,71E+01	1,47E+01	1,18E+01	5,50E-05
Sulphur hexafluoride	1,89E-06	1,60E-06	1,05E-07	1,43E-10
Sulphuric acid	2,28E-06	3,47E-06	3,59E-06	2,86E-10
Tin oxide	2,41E-09	2,05E-09	1,34E-10	3,70E-07
Zinc oxide	4,81E-09	4,09E-09	2,68E-10	2,86E-10
Zinc sulphate	4,10E-07	1,03E-06	5,34E-07	3,70E-07
Organic emissions (group VOC)	6,90E+00	1,12E+01	4,88E+01	4,88E+01
Group NMVOC - PAH	9,99E-04	1,81E-04	1,28E-03	1,28E-03
Anthracene	4,68E-08	1,00E-07	5,69E-08	2,62E-08
Benzo{a}anthracene	2,36E-08	5,03E-08	2,86E-08	1,32E-08
Benzo{a}pyrene	2,83E-07	4,45E-07	1,09E-06	1,72E-06
Benzo{ghi}perylene	2,10E-08	4,49E-08	2,55E-08	1,18E-08
Benzofluoranthene	4,20E-08	8,97E-08	5,11E-08	2,35E-08
Chrysene	5,79E-08	1,24E-07	7,03E-08	3,24E-08
Dibenz(a)anthracene	1,31E-08	2,80E-08	1,59E-08	7,33E-09
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	1,56E-08	3,34E-08	1,90E-08	8,75E-09
Naphthalene	4,92E-06	1,05E-05	5,98E-06	2,75E-06
Phenanthrene	1,54E-06	3,30E-06	1,88E-06	8,64E-07

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	9,92E-04	1,66E-04	1,27E-03	7,23E-04
Group NMVOC - Halogenated organic	2,80E-04	2,44E-04	2,04E-03	2,19E-03
Dichloromethane (methylene chloride)	1,26E-13	7,29E-14	4,66E-13	4,96E-13
Dioxins (unspec.)	1,46E-12	3,90E-12	1,94E-12	1,29E-12
Halogenated hydrocarbons (unspecified)	1,56E-13	1,16E-13	2,33E-13	2,67E-13
Hexachlorobenzene (Perchlorobenzene)	0,00E+00	0,00E+00	1,78E-08	0,00E+00
Polychlorinated biphenyls (PCB unspecified)	3,92E-08	9,24E-08	4,64E-08	3,21E-08
Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (2,3,7,8 - TCDD)	8,60E-10	6,18E-10	6,34E-10	4,81E-09
R 11 (trichlorofluoromethane)	1,03E-04	8,78E-05	7,78E-04	8,35E-04
R 114 (dichlorotetrafluoroethane)	1,06E-04	8,99E-05	7,97E-04	8,55E-04
R 12 (dichlorodifluoromethane)	2,22E-05	1,89E-05	1,67E-04	1,79E-04
R 13 (chlorotrifluoromethane)	1,40E-05	1,18E-05	1,05E-04	1,13E-04
R 22 (chlorodifluoromethane)	2,43E-05	2,06E-05	1,83E-04	1,96E-04
Tetrafluoromethane	4,44E-06	3,81E-06	3,78E-06	4,02E-06
Vinyl chloride (VCM; chloroethene)	5,86E-06	1,06E-05	9,00E-06	5,93E-06
Group NMVOC - Others	1,87E+00	1,20E+00	3,06E+01	2,61E+00
Acetaldehyde (Ethanal)	2,32E-03	1,38E-03	8,82E-03	1,49E-03
Acetic acid	9,70E-03	6,71E-03	4,37E-03	6,44E-03
Acetone (dimethylcetone)	2,30E-03	1,35E-03	1,00E-03	1,48E-03
Acrolein	3,30E-07	7,05E-07	4,02E-07	1,85E-07
Aldehyde (unspecified)	1,53E-03	1,30E-03	1,40E-04	1,50E-04
Alkane (unspecified)	1,55E-02	1,05E-02	2,28E-02	2,62E-02
Alkene (unspecified)	6,97E-03	5,79E-03	1,93E-02	2,08E-02

Aromatic hydrocarbons (unspecified)	8,99E-04	4,97E-04	3,66E-04	5,68E-04
Benzene	1,44E-02	6,34E-03	1,35E-01	3,64E-03
Butadiene	1,74E-09	1,63E-09	2,43E-07	2,59E-07
Butane	6,54E-02	1,14E-01	6,89E-02	4,72E-02
Butane (n-butane)	6,02E-03	1,39E-02	7,21E-03	7,62E-03
Cyclohexane (hexahydro benzene)	5,79E-07	4,96E-07	2,45E-06	2,61E-06
Diethyl amine (ethylene ethane amine)	4,72E-14	4,24E-14	6,16E-12	6,57E-12
Ethane	1,84E-01	4,03E-01	2,25E-01	2,08E-01
Ethanol	4,56E-03	2,54E-03	2,34E-03	3,39E-03
Ethene (ethylene)	2,25E-05	3,76E-05	4,50E-05	6,95E-05
Ethyl benzene	6,53E-03	5,57E-03	1,99E-02	2,05E-02
Fluoranthene	1,52E-07	3,26E-07	7,65E+00	8,53E-08
Fluorene	4,84E-07	1,03E-06	1,72E+01	2,71E-07
Formaldehyde (methanal)	1,35E-02	1,74E-02	1,87E-02	1,51E-02
Heptane (isomers)	1,86E-03	6,00E-04	1,44E-03	8,54E-04
Hexamethylene diamine (HMDA)	1,03E-10	9,56E-11	1,43E-08	1,53E-08
Hexane (isomers)	2,79E-03	9,15E-04	2,34E-03	1,49E-03
Hydrocarbons, aromatic	0,00E+00	0,00E+00	8,56E-02	0,00E+00
Mercaptan (unspecified)	7,43E-05	1,38E-04	1,13E-04	7,14E-05
Methanol	4,50E-03	2,49E-03	1,83E-03	2,85E-03
NMVOC (unspecified)	1,15E+00	2,03E-01	9,46E-01	8,73E-01
Octane	1,03E-03	3,30E-04	7,92E-04	4,70E-04
Pentane (n-pentane)	3,55E-02	7,30E-02	4,67E-02	4,00E-02

Phenol (hydroxy benzene)	1,25E-07	1,06E-07	3,75E+00	1,12E-08
Propane	3,07E-01	3,07E-01	2,77E-01	2,08E-01
Propene (propylene)	5,93E-04	5,04E-04	1,74E-03	1,87E-03
Propionic acid (propane acid)	1,48E-08	4,48E-09	5,52E-08	3,76E-07
Styrene	6,41E-10	5,49E-10	2,71E-09	2,89E-09
Toluene (methyl benzene)	5,12E-03	2,78E-03	4,31E-02	9,41E-03
Trimethylbenzene	2,34E-08	1,99E-08	1,31E-09	1,39E-09
Xylene (dimethyl benzene)	3,26E-02	2,37E-02	8,45E-02	8,60E-02
Methane	5,03E+00	9,97E+00	1,92E+01	3,17E+01
Organic chlorine compounds	1,41E-09	1,28E-09	4,55E-09	1,67E-08
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (creosote)	0,00E+00	0,00E+00	1,36E+02	0,00E+00
VOC (unspecified)	5,10E-04	1,31E-03	1,25E-03	1,07E-03
Other emissions	9,48E+04	1,75E+04	1,18E+05	2,18E+05
Particles	1,65E+00	1,34E+00	1,26E+00	1,42E+00
Dust (PM10)	1,42E-01	1,15E-01	4,21E-02	4,34E-02
Dust (PM2.5)	6,76E-01	5,32E-01	3,26E-01	2,97E-01
Dust (unspecified)	8,36E-01	6,90E-01	7,27E-01	1,08E+00
Metals (unspecified)	1,17E-07	9,91E-08	3,13E-09	1,51E-08
Particles	0,00E+00	0,00E+00	1,69E-01	0,00E+00
Wood (dust)	8,88E-07	7,55E-07	4,95E-08	5,27E-08
Radioactive	1,21E-04	1,03E-04	9,13E-04	9,80E-04
EMISSIONS TO WATER				

Emissions to fresh water	1,24E+01	1,29E+01	1,20E+02	1,27E+02
Analytical measures	1,51E+00	1,35E+00	2,66E+00	2,98E+00
Adsorbable organic halogen compounds (AOX)	6,24E-04	1,04E-03	1,26E-03	9,43E-04
Biological oxygen demand (BOD)	4,80E-03	1,05E-02	6,85E-03	5,73E-03
Chemical oxygen demand (COD)	1,47E+00	1,31E+00	2,51E+00	2,81E+00
Solids (dissolved)	1,78E-02	1,51E-02	1,33E-01	1,43E-01
Total dissolved organic bounded carbon	5,92E-07	5,03E-07	6,50E-07	6,95E-07
Total organic bounded carbon	1,20E-02	1,38E-02	1,24E-02	2,19E-02
Heavy metals	5,39E-02	4,77E-02	6,63E+00	7,31E+00
Antimony	4,57E-09	3,89E-09	2,55E-10	2,71E-10
Arsenic (+V)	1,68E-04	8,09E-05	6,17E-04	5,43E-04
Cadmium (+II)	1,17E-04	7,47E-05	2,81E-04	2,58E-04
Chromium (+III)	1,36E-04	1,16E-04	2,25E-04	2,41E-04
Chromium (+VI)	2,33E-08	9,54E-13	2,19E-08	2,78E-08
Chromium (unspecified)	2,62E-04	1,08E-04	4,84E-04	4,03E-04
Cobalt	1,02E-07	1,94E-07	1,63E-07	1,04E-07
Copper (+II)	3,42E-04	5,97E-04	6,99E-04	5,67E-04
Heavy metals to water (unspecified)	9,91E-07	7,66E-07	1,09E-05	3,68E-05
Iron	4,67E-02	4,30E-02	6,60E+00	7,28E+00
Lead (+II)	3,38E-04	3,57E-04	2,11E-03	2,22E-03
Manganese (+II)	1,12E-03	9,54E-04	9,50E-03	1,03E-02
Mercury (+II)	1,53E-06	3,16E-06	2,49E-05	2,60E-05
Molybdenum	2,79E-04	2,31E-04	2,26E-03	2,42E-03

Nickel (+II)	1,35E-04	1,80E-04	5,38E-04	5,25E-04
Selenium	5,48E-05	4,13E-05	3,92E-04	4,16E-04
Silver	2,90E-07	2,45E-07	2,10E-06	2,84E-06
Strontium	4,01E-03	1,74E-03	1,00E-02	9,07E-03
Thallium	6,95E-09	1,72E-08	9,17E-09	6,42E-09
Tin (+IV)	1,30E-08	1,10E-08	8,37E-08	8,97E-08
Titanium	3,32E-05	2,84E-05	2,35E-04	2,52E-04
Vanadium (+III)	9,92E-05	7,91E-05	6,88E-04	7,33E-04
Zinc (+II)	1,04E-04	1,69E-04	8,19E-04	8,56E-04
Inorganic emissions	7,86E+00	3,42E+00	1,06E+02	1,12E+02
Acid (calculated as H+)	2,33E-05	2,35E-05	6,69E-04	7,12E-04
Aluminum (+III)	9,35E-03	7,95E-03	7,06E-02	7,58E-02
Ammonia	2,23E-05	1,87E-05	2,82E-05	3,66E-04
Ammonium / ammonia	3,46E-02	9,02E-03	7,34E-02	5,19E-02
Barium	9,50E-04	2,36E-04	1,11E-03	7,20E-04
Beryllium	3,64E-07	3,09E-07	2,74E-06	2,93E-06
Boron	1,51E-04	4,51E-05	2,53E-02	2,71E-02
Bromine	1,68E-07	3,26E-07	2,75E-07	1,74E-07
Calcium (+II)	1,40E-01	2,06E-02	4,04E+00	4,36E+00
Carbonate	5,86E-02	1,38E-02	6,08E-02	3,56E-02
Chloride	6,39E+00	2,42E+00	5,61E+01	5,88E+01
Chlorine (dissolved)	1,30E-02	1,11E-02	9,77E-02	1,05E-01
Cyanide	5,58E-06	1,77E-06	3,71E-06	2,64E-06

Fluoride	6,99E-02	2,14E-02	1,15E+01	1,23E+01
Fluorine	3,65E-06	6,58E-06	2,21E-05	3,54E-05
Hydrogen chloride	9,72E-07	9,03E-07	2,92E-07	2,93E-07
Hydrogen fluoride (hydrofluoric acid)	2,69E-07	4,61E-07	3,60E-07	2,34E-07
Hydroxide	1,02E-04	8,87E-05	9,82E-06	9,97E-06
Inorganic salts and acids (unspecified)	1,24E-14	0,00E+00	1,17E-14	5,84E-15
Magnesium (+III)	6,82E-03	4,51E-03	7,81E-01	8,36E-01
Magnesium chloride	2,44E-09	1,42E-09	9,08E-09	9,67E-09
Neutral salts	2,31E-08	5,02E-11	2,17E-08	1,13E-08
Nitrate	4,53E-03	2,51E-03	3,99E-01	4,28E-01
Nitrogen	1,71E-04	1,82E-05	1,60E-04	3,07E-06
Nitrogen organic bounded	5,96E-03	1,87E-03	3,69E-03	2,06E-03
Phosphate	6,66E-04	2,27E-04	1,20E-03	1,13E-03
Phosphorus	2,32E-04	4,57E-04	3,82E-04	2,42E-04
Potassium	1,15E-04	1,73E-04	3,92E-04	9,19E-04
Silicate particles	1,28E-08	2,57E-08	4,48E-08	4,35E-08
Sodium (+I)	2,64E-01	3,14E-01	6,82E+00	7,65E+00
Sodium chloride (rock salt)	1,13E-05	9,58E-06	6,89E-07	7,36E-07
Sodium hypochlorite	1,80E-06	4,71E-07	1,32E-06	1,76E-06
Sulphate	8,58E-01	5,94E-01	2,55E+01	2,76E+01
Sulphide	1,10E-02	2,63E-03	1,08E-02	5,95E-03
Sulphite	4,60E-05	1,39E-05	7,68E-03	8,23E-03
Sulphur	8,85E-08	7,33E-08	2,71E-07	2,88E-07

Sulphuric acid	1,25E-04	1,16E-04	3,77E-05	3,78E-05
Organic emissions	4,56E-02	1,99E-02	4,53E-02	2,33E-02
Halogenated organic emissions	7,79E-07	5,54E-07	4,65E-06	3,98E-05
1,2-Dibromoethane	1,36E-10	1,16E-10	5,75E-10	6,14E-10
Chlorinated hydrocarbons (unspecified)	3,47E-11	2,95E-11	8,70E-13	1,13E-12
Chloromethane (methyl chloride)	7,61E-07	5,39E-07	4,64E-06	3,98E-05
Dichloropropane	8,24E-14	7,67E-14	1,15E-11	1,22E-11
Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (2,3,7,8 - TCDD)	3,01E-19	1,75E-19	1,12E-18	1,19E-18
Vinyl chloride (VCM; chloroethene)	1,69E-08	1,44E-08	1,03E-09	1,10E-09
Hydrocarbons	4,16E-02	9,06E-03	3,99E-02	1,97E-02
Acenaphthene	1,78E-07	4,38E-08	1,78E-07	9,83E-08
Acenaphthylene	7,39E-08	1,75E-08	7,38E-08	4,07E-08
Acetic acid	9,80E-04	1,35E-04	1,17E-03	6,27E-04
Acrylonitrile	6,02E-09	5,61E-09	8,39E-07	8,96E-07
Anthracene	2,64E-07	7,27E-08	2,49E-07	1,39E-07
Aromatic hydrocarbons (unspecified)	5,73E-05	1,07E-04	6,77E-05	4,45E-05
Benzene	3,35E-04	1,45E-04	3,55E-04	3,36E-04
Benzo[a]anthracene	2,49E-08	5,24E-09	2,61E-08	1,43E-08
Benzofluoranthene	1,27E-08	2,13E-09	1,48E-08	8,00E-09
Chrysene	1,11E-07	2,19E-08	1,19E-07	6,48E-08
Cresol (methyl phenol)	2,29E-09	1,90E-09	7,03E-09	7,47E-09
Ethyl benzene	1,96E-05	5,11E-06	2,11E-05	3,65E-05
Fluoranthene	3,10E-08	9,76E-09	3,09E-08	1,71E-08

Hexane (isomers)	1,98E-09	1,68E-09	8,64E-10	9,18E-10
Hydrocarbons (unspecified)	2,74E-04	2,32E-04	8,79E-04	1,16E-03
Methanol	2,99E-02	1,02E-03	3,44E-02	1,27E-02
Oil (unspecified)	1,70E-03	7,76E-04	1,73E-03	2,39E-03
Phenol (hydroxy benzene)	4,01E-04	1,03E-04	3,73E-04	3,60E-04
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH, unspec.)	7,54E-03	6,41E-03	4,41E-04	6,20E-04
Toluene (methyl benzene)	1,98E-04	7,06E-05	2,09E-04	2,47E-04
Xylene (isomers; dimethyl benzene)	1,29E-04	5,46E-05	2,10E-04	1,10E-03
Carbon, organically bound	4,05E-03	1,08E-02	5,40E-03	3,59E-03
Naphthalene	1,02E-05	2,77E-06	1,00E-05	5,56E-06
Organic chlorine compounds (unspecified)	1,41E-09	1,28E-09	4,55E-09	1,67E-08
Organic compounds (dissolved)	9,38E-08	7,98E-08	5,74E-09	6,13E-09
Organic compounds (unspecified)	2,26E-20	2,13E-20	4,88E-21	4,71E-21
Particles	2,89E+00	8,08E+00	5,31E+00	4,18E+00
Metals (unspecified)	2,96E-07	2,49E-07	1,67E-08	3,32E-08
Soil loss by erosion into water	5,36E-06	9,02E-06	6,53E-06	4,09E-06
Solids (suspended)	2,89E+00	8,08E+00	5,31E+00	4,18E+00
Emissions to sea water	2,17E+01	3,86E+00	1,93E+01	1,09E+01
Analytical measures	2,79E-02	1,33E-02	2,18E-02	1,28E-02
Adsorbable organic halogen compounds (AOX)	5,85E-10	7,70E-10	2,74E-10	1,90E-10
Biological oxygen demand (BOD)	6,46E-04	8,49E-04	3,02E-04	2,10E-04
Chemical oxygen demand (COD)	2,66E-02	1,16E-02	2,12E-02	1,24E-02

Total organic bounded carbon	6,46E-04	8,49E-04	3,02E-04	2,10E-04
Heavy metals	4,44E-03	8,16E-04	3,95E-03	2,25E-03
Arsenic (+V)	6,50E-05	2,09E-05	4,23E-05	2,61E-05
Cadmium (+II)	3,49E-05	1,56E-05	4,11E-05	3,47E-05
Chromium (unspecified)	2,26E-04	1,35E-04	6,65E-05	4,12E-05
Cobalt	1,08E-04	1,39E-05	1,02E-04	5,70E-05
Copper (+II)	1,29E-04	7,46E-05	7,75E-05	4,89E-05
Iron	1,33E-03	1,71E-04	1,25E-03	7,01E-04
Lead (+II)	2,72E-05	1,68E-05	1,55E-05	9,83E-06
Manganese (+II)	1,39E-04	1,79E-05	1,31E-04	7,33E-05
Mercury (+II)	9,12E-07	3,68E-07	7,28E-07	4,25E-07
Molybdenum	6,74E-10	5,58E-10	2,06E-09	2,19E-09
Nickel (+II)	8,67E-05	2,81E-05	6,71E-05	3,94E-05
Silver	2,00E-09	1,66E-09	6,11E-09	6,49E-09
Strontium	5,49E-05	2,41E-05	5,16E-05	3,18E-05
Tin (+IV)	2,39E-09	1,98E-09	7,31E-09	7,77E-09
Titanium	2,44E-10	2,02E-10	7,45E-10	7,91E-10
Vanadium (+III)	7,41E-05	9,56E-06	6,98E-05	3,91E-05
Zinc (+II)	2,17E-03	2,88E-04	2,04E-03	1,14E-03
Inorganic emissions	2,11E+01	3,16E+00	1,90E+01	1,08E+01
Aluminum (+III)	7,85E-09	6,50E-09	2,40E-08	2,55E-08
Ammonia	2,33E-07	1,93E-07	7,13E-07	7,57E-07
Barium	4,17E-03	6,36E-04	3,76E-03	2,13E-03

Beryllium	6,17E-06	7,97E-07	5,82E-06	3,26E-06
Boron	1,27E-07	1,05E-07	3,88E-07	4,12E-07
Calcium (+II)	1,39E-05	1,15E-05	4,23E-05	4,50E-05
Carbonate	2,62E-01	3,90E-02	2,36E-01	1,33E-01
Chloride	2,07E+01	3,08E+00	1,86E+01	1,05E+01
Magnesium	1,16E-04	1,51E-04	6,29E-05	4,75E-05
Nitrate	3,40E-04	5,19E-05	3,07E-04	1,73E-04
Sodium (+I)	1,29E-02	1,70E-02	6,03E-03	4,19E-03
Sulphate	1,10E-01	2,02E-02	1,01E-01	5,72E-02
Sulphide	4,77E-02	6,36E-03	4,28E-02	2,41E-02
Sulphur	6,79E-08	5,63E-08	2,07E-07	2,20E-07
Organic emissions	1,37E-02	2,44E-03	1,30E-02	7,30E-03
Hydrocarbons	1,36E-02	2,42E-03	1,28E-02	7,19E-03
Acenaphthene	6,33E-06	7,53E-07	6,36E-06	3,49E-06
Acenaphthylene	2,41E-06	2,86E-07	2,42E-06	1,33E-06
Acetic acid	1,68E-05	2,17E-06	1,70E-05	9,36E-06
Anthracene	1,56E-06	2,34E-07	1,48E-06	8,20E-07
Aromatic hydrocarbons (unspecified)	6,46E-06	8,49E-06	3,02E-06	2,10E-06
Benzene	9,15E-04	2,81E-04	8,54E-04	4,92E-04
Benzo[a]anthracene	1,43E-06	1,66E-07	1,44E-06	7,89E-07
Benzofluoranthene	1,59E-06	1,83E-07	1,61E-06	8,83E-07
Chrysene	8,07E-06	9,32E-07	8,15E-06	4,47E-06
Cresol (methyl phenol)	1,76E-09	1,46E-09	5,37E-09	5,71E-09

Ethyl benzene	9,43E-05	8,13E-05	1,02E-04	6,32E-05
Fluoranthene	1,67E-06	2,01E-07	1,68E-06	9,21E-07
Hexane (isomers)	1,92E-10	1,59E-10	5,87E-10	6,23E-10
Oil (unspecified)	9,45E-03	1,41E-03	8,96E-03	5,00E-03
Phenol (hydroxy benzene)	2,03E-03	3,48E-04	1,92E-03	1,08E-03
Toluene (methyl benzene)	5,11E-04	2,20E-04	4,95E-04	2,90E-04
Xylene (isomers; dimethyl benzene)	4,99E-04	6,69E-05	4,31E-04	2,46E-04
Naphthalene	1,97E-04	2,35E-05	1,96E-04	1,08E-04
Particles to sea water	5,14E-01	6,76E-01	2,40E-01	1,67E-01
EMISSIONS TO SOIL	2,10E-01	3,18E-01	2,03E-01	1,30E-01
Heavy metals to industrial soil	3,01E-02	5,92E-02	4,92E-02	3,12E-02
Arsenic (+V)	7,57E-08	1,05E-07	6,18E-08	4,01E-08
Cadmium (+II)	8,56E-07	1,10E-06	5,70E-07	3,74E-07
Chromium (+III)	2,06E-08	1,82E-08	2,47E-09	2,46E-09
Chromium (unspecified)	1,35E-04	2,15E-04	1,52E-04	9,71E-05
Cobalt	1,62E-06	3,16E-06	2,67E-06	1,69E-06
Copper (+II)	1,03E-06	1,89E-06	1,53E-06	9,72E-07
Iron	1,57E-04	2,79E-04	2,20E-04	1,39E-04
Lead (+II)	6,45E-08	8,22E-08	4,38E-08	2,93E-08
Manganese (+II)	8,26E-05	9,11E-05	3,47E-05	2,35E-05
Mercury (+II)	2,05E-09	3,75E-09	3,04E-09	1,93E-09
Nickel (+II)	2,44E-04	2,36E-04	5,50E-05	4,00E-05

Strontium	2,94E-02	5,83E-02	4,88E-02	3,09E-02
Zinc (+II)	2,13E-05	2,92E-05	1,72E-05	1,11E-05
Inorganic emissions to industrial soil	1,45E-01	2,24E-01	1,52E-01	9,76E-02
Aluminum (+III)	2,08E-04	2,89E-04	1,74E-04	1,12E-04
Ammonia	4,75E-02	9,29E-02	7,72E-02	4,89E-02
Bromide	1,39E-05	2,71E-05	2,29E-05	1,44E-05
Calcium (+II)	2,84E-02	2,42E-02	1,58E-03	1,69E-03
Chloride	1,78E-02	3,30E-02	2,68E-02	1,70E-02
Fluoride	4,62E-04	9,03E-04	7,62E-04	4,82E-04
Magnesium (+III)	3,93E-03	3,34E-03	2,19E-04	2,33E-04
Phosphorus	4,80E-03	9,50E-03	7,93E-03	5,02E-03
Potassium (+I)	2,00E-02	2,98E-02	1,97E-02	1,27E-02
Sodium (+I)	2,49E-03	2,12E-03	1,39E-04	1,48E-04
Sulphate	2,79E-03	4,01E-03	2,51E-03	1,62E-03
Sulphide	1,67E-02	2,41E-02	1,51E-02	9,72E-03
Organic emissions to industrial soil	3,50E-02	3,50E-02	1,26E-03	1,34E-03

ANEXO 5

Explicação do cálculo da emissão do dióxido de carbono equivalente proveniente da decomposição do dormente de madeira disposto no aterro

Cenários 7 e 19 – Considerando a disposição no aterro de ambos os materiais

A composição dos resíduos sólidos urbanos e a sua disposição em aterros sanitários ou em lixões (vazadouros a céu aberto) provoca a fermentação anaeróbia de parte desses resíduos, liberando biogás (basicamente metano e dióxido de carbono) para a atmosfera. A forma utilizada para calcular as emissões da decomposição da madeira geradas nos aterros sanitários alemães e brasileiros foi a disponibilizada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (em inglês - *Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) (IPCCa, 2006), como mostrado na Equação 1:

$$\text{Emissão de metano} = (Q \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_R \times \text{FEM} \times 16/12 - R) \times (1 - \text{OX}) \text{ [Eq. 1]}$$

Onde:

Q = Peso total da madeira disposta em locais de disposição final dos resíduos sólidos. São considerados quatro tipos de locais: (i) aterros sanitários; (ii) vazadouros com células de até 5 metros de altura; (iii) vazadouros com células maiores; e (iv) categoria não definida. Neste estudo se refere ao peso do dormente de madeira natural (86 kg no Brasil e 80 kg na Alemanha, como apresentado no Capítulo 4).

FCM = Fator de Correção do Metano. É o percentual da matéria que se decompõem em condições anaeróbicas. Em locais sem manejo adequado dos resíduos (como em lixões) a geração de metano é menor que em locais com manejo (caso dos aterros sanitários). Esse fator varia em função de cada tipo de local de disposição, podendo valer 0,4 para os vazadouros com células de até cinco metros; 0,6 para locais de categoria não definida; 0,8 para os vazadouros com células maiores que cinco metros; e 1,0 no caso dos aterros sanitários.

COD = Carbono Organicamente Degradável. É o carbono orgânico que sofre decomposição bioquímica. Seu valor está relacionado à composição orgânica de cada resíduo. O percentual de carbono nos produtos de madeira ao final da sua vida útil é de aproximadamente 85%; e o percentual do COD contido na madeira seca é de 50%

e na madeira úmida de 43%. Ou seja, o valor de *default* do COD da madeira é de 0,5 kg C/kg madeira ($0,85 \times 0,50 + 0,15 \times 0,43$).

COD_R = Fração do COD que realmente degrada. Como o processo anaeróbio é incompleto, parte do carbono potencialmente degradável não atinge a degradação. O valor sugerido pela metodologia do IPCC é 50%.

FEM = Fração de carbono emitida como metano. O biogás gerado no aterro a partir da decomposição anaeróbica dos resíduos é composto basicamente por metano (40-60%) e dióxido de carbono (45%). O valor sugerido pelo IPCC para o metano é 50%.

$16/12$ = Taxa de conversão, em peso molecular, do carbono para o metano ($kgCH_4/kgC$).

$44/12$ = Taxa de conversão, em peso molecular, do carbono para o dióxido de carbono (CO_2/C).

R = Metano Recuperado. Refere-se à parcela recuperada em cada local de disposição, como a queima do biogás no *flare* (chaminé como medida de segurança para risco de incêndio e explosões) ou para gerar energia elétrica. Influenciando, assim, nas emissões líquidas de metano, pois se queimado o gás não é emitido como metano. O valor sugerido pelo IPCC é zero.

OX = Fator de Oxidação. Quando não há oxidação, o OX é zero e se 100% do metano é oxidado, o OX é 1. A tecnologia de aplicação de camadas de filtros de oxidação de metano representa uma alternativa para reduzir as emissões de metano em aterros. O valor sugerido pelo IPCC é zero.

GWP do CH_4 = Potencial de Aquecimento Global do metano expresso em termos de dióxido de carbono equivalente. O indicador disponibilizado no GaBi *CML-96 Global Warming Potential (100 years)* utiliza o valor igual a 21 para o metano. Neste estudo assumiu-se o mesmo valor. Maiores detalhes sobre o GWP podem ser encontrados no item 4.2.4.

Considerando a disposição da madeira natural após o seu tempo de uso como dormente de ferrovia em aterro sanitário no Brasil e na Alemanha, a emissão de

dióxido de carbono equivalente gerada pela decomposição de um dormente de madeira natural é de:

Brasil

a) Emissão de $\text{CH}_4 = (Q \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_R \times \text{FEM} \times 16/12 - R) \times (1 - \text{OX}) = (86 \text{ kg madeira} \times 1,0 \times 0,5 \text{ kg C/kg madeira} \times 0,5 \times 0,5 \times 16/12 \text{ kg CH}_4/\text{kg C} - 0) \times (1 - 0) = 14 \text{ kgCH}_4$

Emissão de $\text{CO}_2\text{e} = 14 \text{ kgCH}_4 \times 21 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCH}_4 = 301 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{dormente de madeira natural}$

b) Emissão de $\text{CO}_2 = (Q \times \text{COD} \times \text{COD}_R \times \% \text{CO}_2 \times 44/12) = (86 \text{ kg madeira} \times 0,5 \text{ kg C/kg madeira} \times 0,5 \times 0,45 \times 44/12 \text{ kg CO}_2/\text{kg C}) = 35 \text{ kgCO}_2 / \text{dormente de madeira natural}$

Emissão total de $\text{CO}_2\text{e} = 301 + 35 = 336 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{dormente de madeira natural}$

Alemanha

a) Emissão de $\text{CH}_4 = (Q \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_R \times \text{FEM} \times 16/12 - R) \times (1 - \text{OX}) = (80 \text{ kg madeira} \times 1,0 \times 0,5 \text{ kg C/kg madeira} \times 0,5 \times 0,5 \times 16/12 \text{ kg CH}_4/\text{kg C} - 0) \times (1 - 0) = 13 \text{ kgCH}_4$

Emissão de $\text{CO}_2\text{e} = 13 \text{ kgCH}_4 \times 21 \text{ kgCO}_2\text{e/kgCH}_4 = 280 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{dormente de madeira natural}$

b) Emissão de $\text{CO}_2 = (Q \times \text{COD} \times \text{COD}_R \times \% \text{CO}_2 \times 44/12) = (80 \text{ kg madeira} \times 0,5 \text{ kg C/kg madeira} \times 0,5 \times 0,45 \times 44/12 \text{ kg CO}_2/\text{kg C}) = 33 \text{ kgCO}_2 / \text{dormente de madeira natural}$

Emissão total de $\text{CO}_2\text{e} = 280 + 33 = 313 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{dormente de madeira natural}$