

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia**

Thiago Marandola Lemos

**ANÁLISE DA RECICLAGEM DO ALUMÍNIO NO CICLO DE VIDA DOS AUTOMÓVEIS:  
UMA VISÃO CRÍTICA DA MACROECONOMIA E  
SUSTENTABILIDADE MUNDIAL**

**Belo Horizonte**  
**2019**

Thiago Marandola Lemos

**ANÁLISE DA RECICLAGEM DO ALUMÍNIO NO CICLO DE VIDA DOS AUTOMÓVEIS:  
UMA VISÃO CRÍTICA DA MACROECONOMIA E  
SUSTENTABILIDADE MUNDIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, em associação ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Enrique Castro

**Belo Horizonte  
2019**

L557a Lemos, Thiago Marandola  
Análise da reciclagem do alumínio no ciclo de vida dos automóveis:  
uma visão crítica da macroeconomia e sustentabilidade mundial / Thiago  
Marandola Lemos. – 2019.  
98 f.: il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia da Energia em associação ampla entre a UFSJ e o  
CEFET-MG.

Orientador: Daniel Enrique Castro.

Banca examinadora: Daniel Enrique Castro, André Guimarães  
Ferreira e Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior.

Bibliografia: f. 88-95.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais.

1. Alumínio – Teses. 2. Automóveis – Reaproveitamento – Teses.  
3. Reciclagem – Teses. 4. Ciclo de vida do produto – Análise – Teses.  
5. Eficiência energética – Teses. I. Castro, Daniel Enrique Daniel.  
II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.  
III. Universidade Federal de São João del-Rei. IV. Título.

CDD 621.31

Thiago Marandola Lemos

**ANÁLISE DA RECICLAGEM DO ALUMÍNIO NO CICLO DE VIDA DOS AUTOMÓVEIS:  
UMA VISÃO CRÍTICA DA MACROECONOMIA E  
SUSTENTABILIDADE MUNDIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia da Energia, Em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia da Energia.

Aprovado em, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_.

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Daniel Enrique Castro (orientador) (CEFET-MG)

---

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira (CEFET-MG)

---

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior (PUC-MG)

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a todos aqueles que se esforçam pela perenidade do nosso planeta, que prezam pelo amor à vida, na busca incessante por uma prosperidade partilhada e justa. A todas as pessoas que têm essa consciência ou que, um dia, ainda hão de tê-la. Dedico aos meus futuros filhos e filhas, netos e netas, que eles saibam que seu pai, seu avô, empenhou-se, cotidianamente, na aplicação desses conceitos. A começar por esta dissertação, oportunidade ímpar para difundir ideias e por em prática valores de tamanha importância.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a uma certa energia universal, algo que não sei explicar, mas que posso perceber na conectividade presente, desde a mais ínfima partícula subatômica, até a mais vasta imensidão das galáxias no universo profundo. Somos parte de um todo e estamos interconectados. É exatamente nesse sentido, em que agradeço a Deus, por me proporcionar a saúde e a paz necessárias para seguir adiante nos caminhos da vida.

Agradeço imensamente ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, pela oportunidade do estudo científico e acesso à base de dados do conhecimento acadêmico mundial. Entendo o valor dessa premissa que, embora restrita a grande maioria, apenas reforça a minha responsabilidade perante o benefício concedido. Ainda, ao CEFET-MG, agradeço pela bolsa de estudos, quantia de vital importância para meu sustento nesses instigantes anos do saber.

Não poderia deixar de registrar meu muito obrigado a todos os professores e professoras, de ambas as instituições de ensino, pelos conhecimentos transmitidos em sala de aula. Um agradecimento especial ao professor Daniel, orientador deste trabalho, que o conduziu de forma deliberada, com grande repertório acadêmico e experiência profissional. Agradeço também, ao professor Tim Jackson que, apesar de não conhecê-lo, teve contribuição importante nas reflexões sobre um mundo mais justo e sustentável. Ao engenheiro Rodrigo Marinaro, pela intervenção nos conceitos técnicos de mineração, baseados em uma admirável experiência de campo. Ao *“teacher”* Diogo Scobee pelas correções e ensinamentos no idioma inglês. Obrigado a todos os funcionários administrativos do programa de mestrado pelo auxílio constante nas questões burocráticas. Seria injusto não agradecer também aos terceirizados, pessoal da limpeza, jardim, manutenção, segurança, enfim, todos aqueles que sempre contribuíram para que nossos campus estivessem em impecáveis condições de funcionamento. Deixo a eles meu obrigado em nível de igualdade com todos já citados.

À Escola Estadual Armando Nogueira Soares e aos cursos populares, Darcy Ribeiro e Edson Luís, instrumentos de luta em prol do acesso à educação de qualidade, nos quais, voluntariamente, tive a honra de lecionar, agradeço pela oportunidade e experiência. Em particular, acredito no potencial transformador da educação e, por conseguinte, vejo essa singela contribuição como uma contrapartida que, humildemente, pude oferecer à sociedade em uma permuta valiosa de sabedoria e sonhos.

À minha família agradeço primeiramente, aos meus pais, Estêvão e Christina, por todas as condições providas desde o meu nascimento. Naquele momento, já estava à frente em uma corrida sem sentido e, graças a educação que tive, foi possível a percepção disso. Assim, pude realizar-me do dever moral com aqueles que não tiveram os mesmos privilégios que eu, e fazer disso, em minhas ações, um sentido real para a vida. Aos meus irmãos, agradeço pelo apoio constante e pela confiança. Saudações aos meus avós que, absolutamente, estão orgulhosos dessa conquista. Aos tios e tias, primos e primas, agradeço pelas pacientes conversas e pelo interesse sobre o andamento deste trabalho.

Por último, não menos importante, agradeço aos amigos que, sobretudo, entenderam as minhas escolhas e opções de vida, não deixando que qualquer limitação, seja financeira ou ética, pudesse abalar nossa amizade. Os verdadeiros amigos jamais questionam a amizade, quando eles se encontram, independente do tempo e da distância, parecem que se viram ontem, irradiam felicidade, sem mágoas ou rancor. Sabem que são amigos do peito e ficarão ali para sempre. Aos amigos, meu sincero muito obrigado!

*Inventamos uma sociedade consumista, em que a economia tem que crescer, porque se não cresce é uma tragédia (...) E, então, gastamos o nosso tempo fazendo disso uma forma de viver (...) Contudo, a única coisa que não se pode comprar é a vida, a vida se gasta, e é lamentável gastar a vida para perder a liberdade.*

José Mujica

*O ser humano é uma parte de um todo, chamado por nós de “Universo”, uma parte limitada no tempo e no espaço. Ele experimenta a si mesmo, seus pensamentos e sentimentos, como algo separado do resto – uma espécie de ilusão de ótica de sua consciência.*

Albert Einstein

## RESUMO

A sobrevivência da humanidade nas próximas décadas, estabelece-se em uma situação paradoxal perante a limitação ecológica do planeta Terra. Existe um esforço mundial na busca de soluções que reduzam os impactos ambientais e energéticos nos diversos sistemas de produção existentes. A reciclagem sistêmica de produtos é uma necessidade imprescindível para redução desses impactos. Este trabalho faz uma análise da reciclagem de veículos em fim de vida útil (ELV's – *End of Life Vehicles*) e do papel do Alumínio (Al) no ciclo de vida desses veículos. Sabe-se que a frota mundial de carros está superando a marca de 1 bilhão de unidades e que o número de veículos em fim de vida útil também vem aumentando de forma dramática em quase todo o planeta. Um automóvel possui em média 30 a 150 kg de alumínio, sendo uma tendência o aumento desse valor em busca de redução do peso final do veículo. Existem duas formas de obtenção desse metal, uma por meio da extração direta da natureza, via mineração da bauxita, e a segunda através da reciclagem, incluindo os próprios veículos. Esses dois processos são analisados por meio de levantamentos de Análise de Ciclo de Vida (ACV) já existentes na literatura. Além disso, é feita uma comparação com o cenário brasileiro de reciclagem de latas de bebida. O impacto ambiental e energético foi avaliado mediante à aplicação da ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) sobre o ACV em questão e permitiu mostrar quais são as vantagens e os impactos mais críticos da reciclagem sistêmica de veículos, bem como da produção primária do alumínio. Ademais, é feita uma correlação macroeconômica entre as rotas de produção do alumínio e a redução absoluta da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. A eficiência no uso de recursos, a utilização de energias renováveis, bem como a redução na extração de matérias-primas via reciclagem têm suma importância na sustentabilidade do planeta Terra. Este trabalho visa, através de uma análise ambiental e energética, esclarecer como o papel da reciclagem do alumínio nos carros pode contribuir para esse macroprocesso no Brasil e no mundo.

**Palavras-chave:** Alumínio; Reciclagem de veículos; Análise de ciclo de vida; Eficiência.

## ABSTRACT

The survival of humanity in the upcoming decades will depend on the sustainability of the consumed products. There is a global effort to develop solutions to reduce environmental and energy impacts with the production of these products. A systematic recycling process of these products is an essential need to reduce those impacts. This paper presents a careful analysis of automotive recycling and the role of aluminum in the life cycle of these vehicles. It is known that the number of vehicles is getting close to 1 billion units while the number of end-of-life vehicles (ELVs) has also been increasing dramatically throughout the entire planet. The average car has between 30 to 150 kg of aluminum, there is an increasing trend in this amount in exchange of a reduced final weight of the vehicle. There are two ways of obtaining the metal; one is by the direct extraction of natural resources through the mining of bauxite and the second through its recycling. The two processes are analyzed through existing Life Cycle Assessment (LCA) in the literature. In addition, this work presents a comparison between the Brazilian beverage cans recycling scenario and a simulation of automotive recycling. In an unprecedented way, the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) tool will be directly applied to the LCA, pursuing to point out the most important details of the impact assessment. Furthermore, it is presented a macroeconomic correlation between aluminum production routes and the absolute reduction of the CO<sub>2</sub> emission in atmosphere. Resources efficiency, renewable energies and reduction of raw materials are very important for the sustainability of the planet Earth. The environmental and energy impact assessment presented in this paper will show the role of two aluminum production routes pointing out local and global benefits of a ELVs systemic recycling.

**Keywords:** Aluminum; Vehicle Recycling; Life Cycle Assessment; Efficiency

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo Ford T de 1909 .....	22
Figura 2 – Crescimento do Al nos Veículos.....	24
Figura 3 - Estrutura Interna do Veículo em Al .....	25
Figura 4 - Estrutura Externa do Veículo em Al .....	26
Figura 5 – Conceito de AIV ( <i>Aluminum Intensive Vehicles</i> ) .....	27
Figura 6 – Percentual de Utilização do Al nos Carros .....	27
Figura 7 – Rocha de Bauxita .....	28
Figura 8 – Barragem de Rejeitos.....	30
Figura 9 – Disposição por Ressecamento .....	31
Figura 10 – Mineração da Bauxita e Produção de Alumina .....	32
Figura 11 – Redução: Processo Hall Herot .....	34
Figura 12 - Tarugo, Rolo Caster, Lingote .....	35
Figura 13 – Redução de Resíduos Depositados & RUM Alliance - Japão .....	39
Figura 14 - Conceito de Indústria Venosa e Arterial .....	40
Figura 15 – Distribuição de Veículos por Estado .....	41
Figura 16 - Pátio do DETRAN em MG .....	42
Figura 17 - Fluxograma com as etapas da reciclagem veicular.....	43
Figura 18 - Etapas da Reciclagem no Japão.....	45
Figura 19 - Conceito do Ciclo de Vida de um Produto Aleatório .....	47
Figura 20 – Modelo de Planilha FMEA para um Processo .....	50
Figura 21 – Preço das Commodities no século XX - início XXI.....	52
Figura 22 – Conceito dos 3 Rs.....	55
Figura 23 – Reutilização de Bancos .....	56
Figura 24 – Descasamento Relativo de Emissões.....	58
Figura 25 – Emissões de CO <sub>2</sub> pelo PIB em Nações .....	59
Figura 26 – Tendências de Consumo de Combustíveis Fósseis e CO <sub>2</sub> .....	59

<b>Figura 27 – Média de Massa dos Carros.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 28 – Quantidade de Alumínio Presente nos Carros (kg) .....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 29 – Fluxograma Produção Primária .....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 30 - Fluxograma Produção Secundária.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 31 – FMEA - Impactos mais Críticos - Produção 1<sup>a</sup> .....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 32 - FMEA - Impactos mais Críticos - Produção 2<sup>a</sup> .....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 33 – Produção da Indústria Automotiva Nacional .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 34 – Potencial da Reciclagem Veicular .....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Inventário ACV: AI Primário e Secundário .....	70
Tabela 2 – Classificação do Índice de Severidade de Impactos .....	72
Tabela 3 – Escala para o Índice de Detecção .....	74
Tabela 4 – FMEA Alumínio Primário.....	75
Tabela 5 – FMEA AI Secundário .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AIV	<i>Aluminum Intensive Vehicles</i> (Veículo de alta intensidade de Al)
AFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ARA	<i>Automotive Recycling Association</i>
ASR	<i>Automotive Shredder Residue</i>
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
EAA	<i>European Aluminium Association</i>
ELV	<i>End of Life Vehicle</i> (Veículo em Fim de Vida Útil)
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FMEA	Análise do Modo de Falha e seus Efeitos
GHG	<i>Greenhouse gas</i> (Gases de Efeito Estufa)
IAI	<i>International Aluminium Institute</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ID	Índice de Detecção
IO	Índice de Ocorrência
IREC	<i>International Recycling Education Center</i>
IS	Índice de Severidade
JAMA	<i>Japan Automobile Manufacturers Association</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>

OICA	<i>International Organization of Motor Vehicle Manufacturers</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil
PPM	Partes por Milhão
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
RUM Alliance	<i>Re Use Motorization Alliance</i>
SLCA	<i>Strategic Life Cycle Assessment</i>
WFC	<i>Weight Factor by Category</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio ou alumina
Al(OH) <sub>3</sub>	Hidróxido de Alumínio
C	Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono ou gás carbônico
CF <sub>4</sub>	Tetrafluorometano
%E	Energia Relativa
GWh	Gigawatt - hora
H <sub>2</sub> O	Óxido de hidrogênio (Água)
HF	Ácido Fluorídrico
kWh	Quilowatt – hora
kg	Quilograma
%m	Massa Relativa
N	Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	Amônia
NaOH	Hidróxido de Sódio (Soda Cáustica)
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
t	Tonelada

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>19</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 O Alumínio nos Veículos</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.1 Componentes do Veículo que Possuem Alumínio</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2 As Rotas de Produção do Alumínio</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.1 A Produção Primária do Alumínio</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.2 A Produção Secundária do Alumínio</b> .....	<b>35</b>
<b>2.3 A Reciclagem Automotiva</b> .....	<b>36</b>
<b>2.3.1 A Reciclagem Automotiva Mundo</b> .....	<b>37</b>
<b>2.3.2 A Reciclagem Automotiva no Brasil</b> .....	<b>40</b>
<b>2.3.3 O Processo de Reciclagem de um Veículo</b> .....	<b>43</b>
<b>2.4 A Análise do Ciclo de Vida (ACV)</b> .....	<b>46</b>
<b>2.4.1 Um Breve Histórico da ACV</b> .....	<b>46</b>
<b>2.4.2 O Conceito da ACV</b> .....	<b>47</b>
<b>2.5 A Análise do Modo de Falha e seus Efeitos (FMEA)</b> .....	<b>49</b>
<b>3. MACROECONOMIA E SUSTENTABILIDADE</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1 Conceitos Macroeconômicos</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2 Conceitos de Sustentabilidade</b> .....	<b>54</b>
<b>3.3 Relação PIB x Eficiência Energética</b> .....	<b>57</b>

<b>4. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>62</b>
<b>4.1 Levantamento do Alumínio presente nos carros .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2 Desenvolvimento da ACV – O Ciclo de Vida do Alumínio .....</b>	<b>65</b>
<b>4.3 Elaboração da ACV – Escopo e Fronteiras do Sistema .....</b>	<b>67</b>
<b>4.4 Elaboração do Inventário ACV .....</b>	<b>69</b>
<b>4.5 Aplicação da FMEA ao Inventário ACV .....</b>	<b>71</b>
<b>4.5.1 Definição do Índice de Severidade - (IS) .....</b>	<b>72</b>
<b>4.5.2 Definição do Índice de Ocorrência - (IO) .....</b>	<b>73</b>
<b>4.5.3 Definição do Índice de Detecção - (ID) .....</b>	<b>74</b>
<b>4.6 FMEA Aplicada às Rotas de Produção do Al .....</b>	<b>74</b>
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>78</b>
<b>5.1 Análise dos Impactos mais Críticos com base nos Resultados FMEA .....</b>	<b>78</b>
<b>5.2 Resultados FMEA x Redução Absoluta de CO<sub>2</sub> na Indústria Automotiva .....</b>	<b>81</b>
<b>5.3 Reciclagem Automotiva x Reciclagem de Latas de Bebida .....</b>	<b>83</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>6.1 Trabalhos Futuros .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>96</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O alumínio (Al) possui características peculiares que o fazem um dos metais mais importantes descobertos pelo homem. Segundo dados da Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), o alumínio possui uma baixa massa específica ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ) em relação a outros metais, fazendo com que um bloco de alumínio tenha uma relação de aproximadamente 35% da massa do aço e 30% da massa do cobre, para um mesmo volume de material (ABAL, 2018a). Além de possuir uma alta resistência à corrosão, o alumínio possui boa condutividade elétrica e térmica. Contudo, esse elemento não é encontrado em seu estado metálico puro na crosta terrestre. O metal é extraído da natureza através da mineração da bauxita, que pode ser encontrada em três principais grupos climáticos: o Mediterrâneo, o Tropical e o Subtropical. A bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) para que a produção seja economicamente viável. As reservas brasileiras, além da ótima qualidade do minério, também estão entre as maiores do mundo (ABAL, 2018b).

Para fins deste trabalho, a principal e mais importante característica do alumínio é sua capacidade de ser reciclado inúmeras vezes sem perder as propriedades físico-químicas, garantindo uma elevadíssima versatilidade (HONG *et al.*, 2012). Isso pode ser feito através de um ciclo fechado de produção (*closed-loop*), em que um produto é reciclado e produz recursos para a produção do mesmo produto (LIU e MÜLLER, 2012).

Segundo Castro (2012), atualmente, uma infinidade de impactos ambientais afetam a sociedade. Esse impactos podem ser separados basicamente em dois tipos, o primeiro sendo o excesso de resíduos sólidos, líquidos e gasosos acumulados nos diversos ecossistemas do planeta e o segundo consiste no esgotamento de recursos naturais utilizados para alimentar os sistemas de produção existentes. Um veículo é considerado um dos bens de consumo mais valorizados pelo homem. Com o avanço da tecnologia, tornou-se uma máquina complexa, dotada de inúmeros sistemas auxiliares. Essa evolução tecnológica trouxe, por um lado, uma maior dificuldade no processo de reciclagem dos veículos. Por outro lado, faz com que uma frota de automóveis em fim de vida útil (ELVs – *End of Life Vehicles*) se transforme em uma verdadeira mina urbana, desde que seja devidamente reciclada. Alumínio, cobre, aço, plástico, óleo, vidro, borracha, estes são apenas alguns exemplos dos inúmeros materiais que podem ser reciclados em um veículo. O valor agregado de um ELV, somado às possibilidades de preservação ambiental e redução de impactos por meio de sua reciclagem, atribuem ao tema uma significativa atenção da comunidade acadêmica.

## 1.1 Justificativa

É fato e notória a crescente demanda por produtos que contêm alumínio em sua estrutura. O setor automotivo é um importante mercado que, com o passar dos anos, vem aumentando a porcentagem de alumínio na composição de seus veículos. Um carro de passeio pesa em média  $981 \pm 92$  kg (PASSARINI, 2013), sendo o alumínio responsável por uma faixa que varia, aproximadamente, de 30 a 150 kg por carro (essa consideração é explicitada em capítulos posteriores, com base em diferentes referências bibliográficas). Estudos indicam que, num futuro próximo, haverá um crescimento no uso desse metal que possibilitará uma redução de até 10% no peso total de um veículo, além de uma significativa redução de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, uma vez que a cada 100 kg de redução de massa em um carro, uma economia de 10 g de CO<sub>2</sub> por km percorrido é gerada (PASSARINI, 2013).

Em termos ambientais, uma grande vantagem do alumínio é a possibilidade de ele ser reciclado quantas vezes for necessário sem perder a qualidade. De acordo com Hong *et al.* (2012), para produzir uma tonelada de alumínio é preciso de 1,08 toneladas de alumínio descartado de veículos em fim de vida, ou *end of life vehicles* – ELVs. Segundo Castro (2012), alguns países no mundo, como EUA, Japão e Alemanha, já adotam a reciclagem de veículos de forma sistêmica. Existem diferentes critérios e leis para caracterizar a condição de fim de vida de um carro, contudo o ponto em comum é a possibilidade de detectar a existência de leis regulatórias para viabilizar o processo de reciclagem de veículos. Trata-se de um assunto relativamente novo na literatura acadêmica brasileira, justificando-se por si só sua pesquisa e levantamento de referências bibliográficas sobre o tema.

No Japão, foi criado em 2007, o IREC (*International Recycling Education Center*), um centro de educação visando o aprimoramento de técnicas e processos de reciclagem de veículos (IREC, 2018). Encontra-se em fase de finalização um projeto similar no CEFET-MG, em que uma planta piloto de reciclagem automotiva está sendo construída e também vai abrigar um centro de treinamento (CEFET-MG, 2015; G1, 2015). Outros trabalhos sobre a reciclagem de veículos já foram desenvolvidos pelo Programa de Mestrado de Engenharia da Energia do CEFET-MG, a exemplo de Marques (2016) que pesquisou sobre o ciclo de vida do aço, Reis (2015) que atuou sobre o papel do cobre nos ELVs e, finalmente, Quadra (2015) que realizou pesquisa sobre a reciclagem de polímeros no ciclo de vida dos automóveis. Este trabalho se estabelece como uma sequência lógica para as pesquisas anteriores já realizadas e se justifica ao analisar o papel de mais uma importante matéria-prima na produção de veículos: o alumínio. Portanto, uma comparação entre as duas formas distintas de obtenção desse metal (mineração e reciclagem de veículos) se faz necessária.

## 1.2 Objetivos

Objetivo principal do trabalho é comparar, de forma sistêmica, as duas rotas de produção do alumínio utilizado nos carros. A primeira utiliza a mineração da bauxita, recurso natural e não renovável. A segunda possui como matéria-prima o alumínio proveniente dos próprios veículos reciclados. Ferramentas de análise quantitativas já consolidadas na literatura científica serão utilizadas para atingir este objetivo. A exemplo da ACV (Análise do Ciclo de Vida), que auxilia num levantamento, por meio de inventários, de todos os materiais e recursos necessários para a produção de um determinado produto. Também a FMEA (Análise do Modo de Falha e seus Efeitos) é aplicada, visando a uma exposição mais clara dos índices de criticidade de cada impacto envolvido nas duas diferentes rotas de produção. Portanto, pode-se resumir os objetivos gerais deste trabalho que são, de forma enumerada, apresentados a seguir:

### Objetivos Gerais:

1. Analisar o papel histórico e atual do alumínio presente nos veículos, bem como suas rotas de produção, desde a extração ou reciclagem até seu descarte final.
2. Definir, por meio de inventários, quais os materiais e recursos são necessários à produção de uma tonelada de alumínio, a ser utilizado para fabricação de veículos;
3. Determinar, mediante uma análise metodológica dos inventários, quais são os impactos mais críticos em ambas as rotas de produção do alumínio.

Assim, é estabelecida uma sequência de três objetivos, na qual espera-se, por meio da análise dos resultados obtidos e após os devidos estudos e comparações, determinar qual das rotas de produção do alumínio é mais eficiente em termos ambientais, bem como qual delas consome menos recursos materiais e energéticos para se produzir uma tonelada do metal voltado para a indústria automotiva. Além disso, acrescenta-se outros dois objetivos específicos que visam complementar a teoria abordada neste trabalho:

### Objetivos Específicos:

4. Quantificar, de forma estimada, o peso total de alumínio presente em todos os carros que poderiam ser reciclados, caso já existisse no Brasil uma cadeia sistêmica de reciclagem automotiva. Como esse processo para latas de bebidas já é bem estruturado no país, objetiva-se uma comparação com esse cenário, para se ter uma ideia do potencial que o alumínio presente nos veículos pode representar à indústria.

5. Analisar os resultados obtidos e correlacioná-los diretamente com a redução absoluta do impacto mais crítico a ser descoberto. Esse estudo será feito sob a perspectiva do número de veículos produzidos pela indústria automotiva brasileira. Para isso, serão necessários alguns conceitos de macroeconomia e eficiência energética, que serão posteriormente explicados neste trabalho.

Dessa forma, almeja-se demonstrar, com clareza e respaldo científico, uma análise ambiental detalhada, visando tanto à redução de impactos, quanto de custos operacionais para cada qual das rotas de produção do alumínio. Segundo Jackson (2013), nossa capacidade de prosperar depende de como o ser humano irá lidar com o crescimento econômico perante o paradoxo da limitação ecológica do planeta. Por conseguinte, a eficiência no uso de recursos, a utilização de energias renováveis, bem como a redução na extração de matérias-primas via reciclagem, têm se tornado um assunto de extrema importância no contexto econômico global e ambiental.

Este trabalho objetiva esclarecer e demonstrar, de maneira deliberada, como o papel da reciclagem do alumínio nos carros pode contribuir para esse macroprocesso no Brasil e no mundo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo dedica-se à fundamentação teórica necessária para o cumprimento dos objetivos descritos. Para isso, será necessário um estudo criterioso com base na literatura científica atual, no intuito de definir os conceitos básicos que serão aplicados no desenvolvimento deste trabalho.

Primeiramente, será realizado um estudo sobre a presença do alumínio nos veículos desde os primórdios da produção até os dias atuais. Espera-se, assim, estimar em termos realistas o quão presente e importante esse metal é para a fabricação de um automóvel. Uma vez definido esse estudo, é necessária uma revisão das rotas de produção do alumínio (primário e secundário), que obviamente será utilizado no veículo, com o fito de demonstrar as principais diferenças entre as cadeias produtivas, que envolvem a mineração e a reciclagem do metal.

Nesse sentido, será desenvolvido um estudo específico sobre o processo de reciclagem automotiva, tema este, relativamente novo na literatura científica brasileira, sendo o CEFET-MG a instituição pioneira no país a abordar o assunto em pesquisas e aplicações práticas. Em nível mundial, trata-se de um processo um tanto quanto disperso, cada país possui sua própria legislação a respeito, ou simplesmente ignoram a questão. É fato e notório que a reciclagem de veículos é um assunto importante, visto que o número de veículos em fim de vida útil não para de aumentar. Portanto, esse processo será estudado em detalhes, explicando as diversas etapas para se aproveitar ao máximo um veículo descartado. Um especial destaque será dado para a metodologia japonesa. Assim, contextualizar-se-á o cenário brasileiro e mundial numa relação direta com os objetivos deste trabalho.

Ademais, conceitos básicos de ferramentas científicas utilizadas tanto pela academia quanto pela indústria serão revisados, visto que são de vital importância para o desenvolvimento do estudo. Entre esses conceitos, pode-se incluir a revisão bibliográfica de duas técnicas: a primeira, Análise do Ciclo de Vida (ACV), ou do inglês, *Life Cycle Assessment – LCA*, e a segunda, FMEA ou Análise do Modo de Falha e seus Efeitos, do inglês, *Failure Mode Effect Analysis*.

Por fim, será feita uma pesquisa dedicada exclusivamente a explicar como se aplica de forma simultânea as metodologias FMEA e ACV, quais as suas vantagens e o como essa técnica pode contribuir num cenário comparativo entre duas tecnologias.

É importante ressaltar que existem duas traduções para a palavra alumínio. Uma é do inglês americano: “*aluminum*”. A outra do inglês britânico: “*aluminium*”. Este trabalho utilizará a nomenclatura americana, salvo se a fonte de consulta utilizada for europeia.

## 2.1 O Alumínio nos Veículos

Segundo Castro (2012), pode-se dizer que a história da produção em massa de veículos automotores começa em meados de 1908, quando o então engenheiro Henry Ford, lança o modelo “Ford T”, mostrado na figura 1, um carro repleto de conceitos inovadores para sua época. Contudo, não se sabe ao certo a quantidade de alumínio que esse veículo possuía. O fato é que desde os primeiros anos da produção automotiva, o alumínio já era usado em diversos componentes e partes estruturais dos veículos (THE AL ASSOCIATION, 2018). O próprio Henry Ford já reconhecia que o peso final de um carro era um dos gargalos para o seu desempenho, conforme citação utilizada no relatório da Associação Europeia do Alumínio, *European Aluminium Association* (EAA, 2013, p.2.):

*“Excess weight kills any self-propelled vehicle... Weight may be desirable in a steam roller but nowhere else.” - H.Ford,1924 - O excesso de peso mata qualquer veículo autopropulsor... O peso pode ser desejável em rolo compressor, mas em nenhum outro lugar.*

**Figura 1 - Modelo Ford T de 1909**



Fonte: The Henry Ford Organization (2018).

Nesse sentido, é possível ressaltar, com grande notoriedade no cenário mundial de produção automotiva, uma busca inexorável pela diminuição do peso final do veículo. Esse objetivo é perseguido desde os primórdios da manufatura. Ainda, Castro (2012) disserta que a partir da década de 1970, com o aumento do preço do petróleo, quase todas as montadoras começaram a corrida em busca da redução de massa do veículo, uma vez que um carro mais leve consome menos combustível.

Em primeiro plano, a introdução dos diversos tipos de polímeros foi a medida comum em busca desse objetivo, e teve um crescimento contínuo até 1990, período em que o peso médio do carro diminuiu de aproximadamente 1590 kg até a 1315 kg em média. Depois disso, apesar de as previsões indicarem o contrário, houve uma estabilização na utilização de polímeros em veículos a partir do ano de 1996 (MALAGUETA, 2003). Uma das razões pelo cerceamento dessa utilização é a grande dificuldade de o plástico ser reciclado, uma vez que existem vários tipos desses derivados de petróleo e suas combinações para um processo de reciclagem variam muito (QUADRA, 2015). Por conseguinte, os metais, principalmente o alumínio, passaram a ser uma alternativa vigente, com o fito de se produzir um carro mais leve.

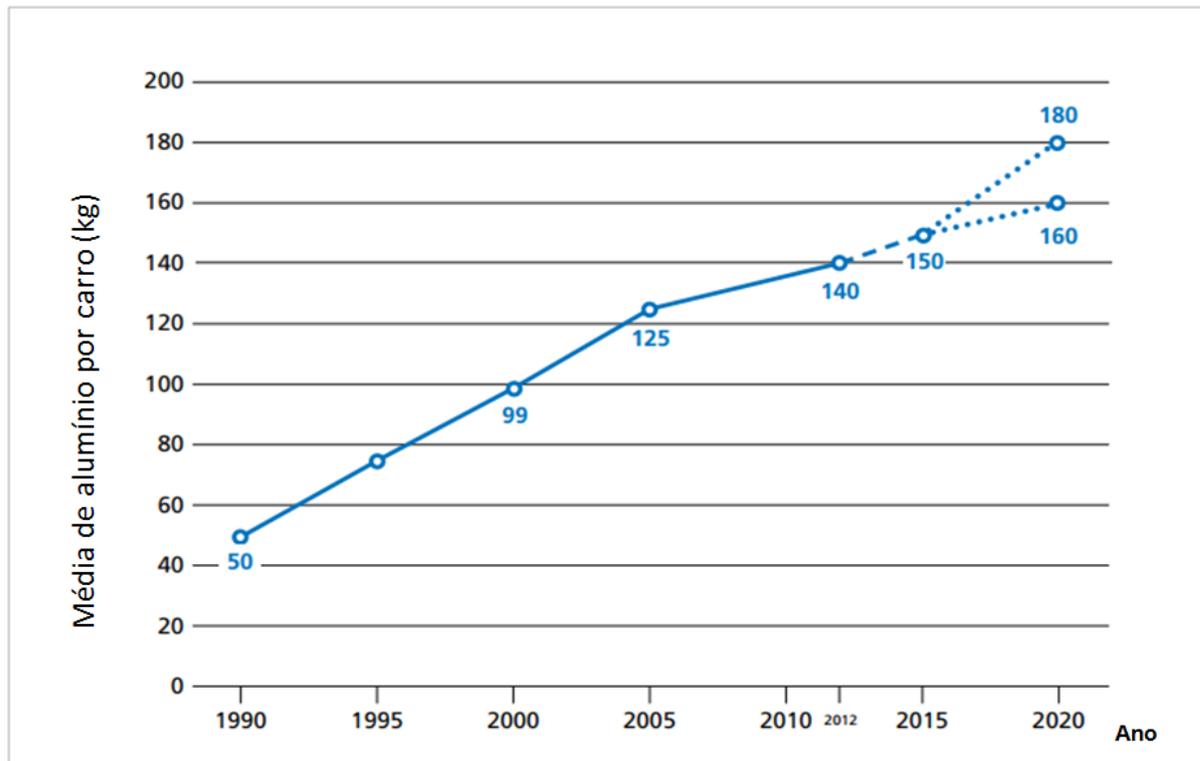
Atualmente, diversos estudos indicam, com o passar dos anos, um aumento gradativo na porcentagem de participação do alumínio frente ao peso total do veículo. De acordo com Modaresi (2012), já em 1930 o alumínio começara a ser usado de forma significativa na produção de automóveis. Numa edição de 1955, a revista científica *Machine Design* publicou um artigo sobre o uso do alumínio nos carros de passeio. Considerava-se, então, um valor médio de 13,6 kg por carro e isso já representava 81000 toneladas de alumínio utilizados pela indústria automotiva naquele ano (MACHINE DESIGN, 2005). Nesse sentido, Modaresi (2012) considera um crescimento contínuo e linear do ano de 1930 a 1978, data em que se assume um valor de 32 kg de alumínio/carro. Em 2009, o autor relata que a quantidade média de alumínio nos carros chegou aos consideráveis 149 kg.

No gráfico da figura 2, é demonstrada essa tendência de crescimento a partir da década de 90. Percebe-se um crescimento contínuo e proporcional da utilização de alumínio nos carros. Além disso, é feita uma estimativa com base no cenário atual, em que, em 2020, um veículo poderá ter de 160 a 180 kg de Al. Desse modo, pode-se assumir um crescimento anual médio na utilização do alumínio nos veículos de, aproximadamente, 10% em relação ao valor médio no ano de 1990.

Segundo Passarini *et al.* (2013), o setor de transporte constitui um dos maiores mercados de uso final do alumínio. Ademais, o alumínio reciclado proveniente do setor automotivo corresponde a 75% de todo metal reciclado na Europa. O autor prevê que o uso

do alumínio nos carros, num futuro próximo, pode chegar aos 140 kg, constituindo, assim, um importante segmento para a indústria de reciclagem. Ainda, o artigo considera que um carro pesa em média  $981 \pm 92$  kg e a média de alumínio estaria em torno de 0,03 a 0,08 kg de Al por kg do veículo. Logo, um carro de 1 tonelada pode ter entre 30 a 80 kg de alumínio.

**Figura 2 – Crescimento do Al nos Veículos**



Fonte: EAA (2013).

Da mesma forma, Das *et al.* (2016) consideram um cenário favorável para a introdução de materiais de baixo peso na fabricação de veículos. Em sua pesquisa são analisados 9 materiais, dentre eles, obviamente, o alumínio, apontando seus benefícios energéticos tanto na fabricação, quanto na perspectiva de uso final do veículo. Das *et al.* (2016) consideram um total de 147 kg de alumínio para os diferentes componentes do grupo motopropulsor no carro.

Além disso, Kim *et al.* (2010) realizaram um estudo em que foi feita uma análise criteriosa de comparação das emissões de gases do efeito estufa (ou GHG - *greenhouse gas*) para diferentes porcentagens (6%, 11% e 23%) de alumínio nos carros, além dos veículos com composição majoritária de aço, usual no mercado. Os resultados demonstram níveis maiores de redução nas emissões de GHG a medida que se aumenta o percentual de alumínio nos carros e, por consequência, reduz seu peso final.

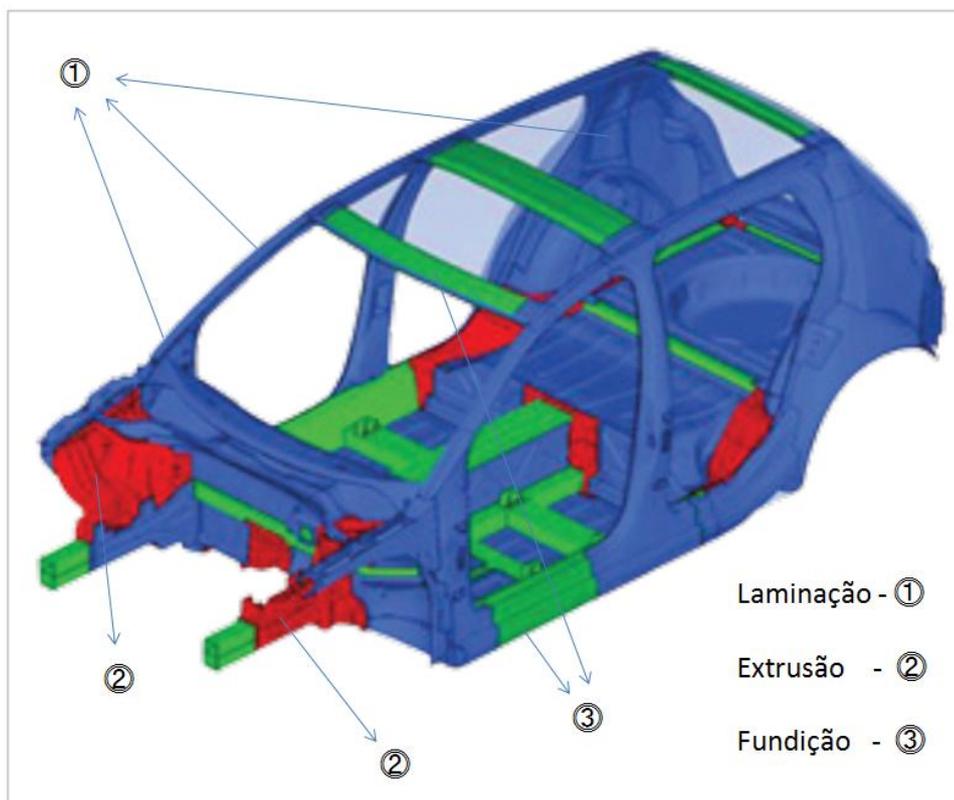
Por fim, segundo Passarini *et al.* (2013), existe uma tendência para a produção de veículos com alta intensidade de alumínio ou do inglês, *aluminum intensive vehicles* (AIVs), o que produziria uma significativa redução de peso nos veículos. Contudo, isso ainda se trata de uma tendência inovadora, visto que a viabilidade econômica do aço ainda é maior que a do alumínio. Os AIVs proveriam uma redução total no peso do veículo e, por consequência, causariam uma redução na emissão de CO<sub>2</sub>, uma vez que menos massa se traduz em menor consumo, ou seja, menos CO<sub>2</sub> emitido por km rodado.

### 2.1.1 Componentes do Veículo que Possuem Alumínio

Conforme demonstrado anteriormente, são inúmeras as vantagens da diminuição do peso final de um veículo. A introdução cada vez maior do alumínio nos diversos componentes de um carro, pode ser uma alternativa viável para se atingir esse objetivo. A seguir, são apresentadas as configurações atuais onde se pode verificar a presença desse metal no setor automotivo. As imagens e dados foram obtidos do relatório da Associação Europeia do Alumínio (EAA, 2013).

Na figura 3, ilustra-se como pode ser feita uma composição totalmente em alumínio da carroceria de um veículo.

**Figura 3 - Estrutura Interna do Veículo em Al**

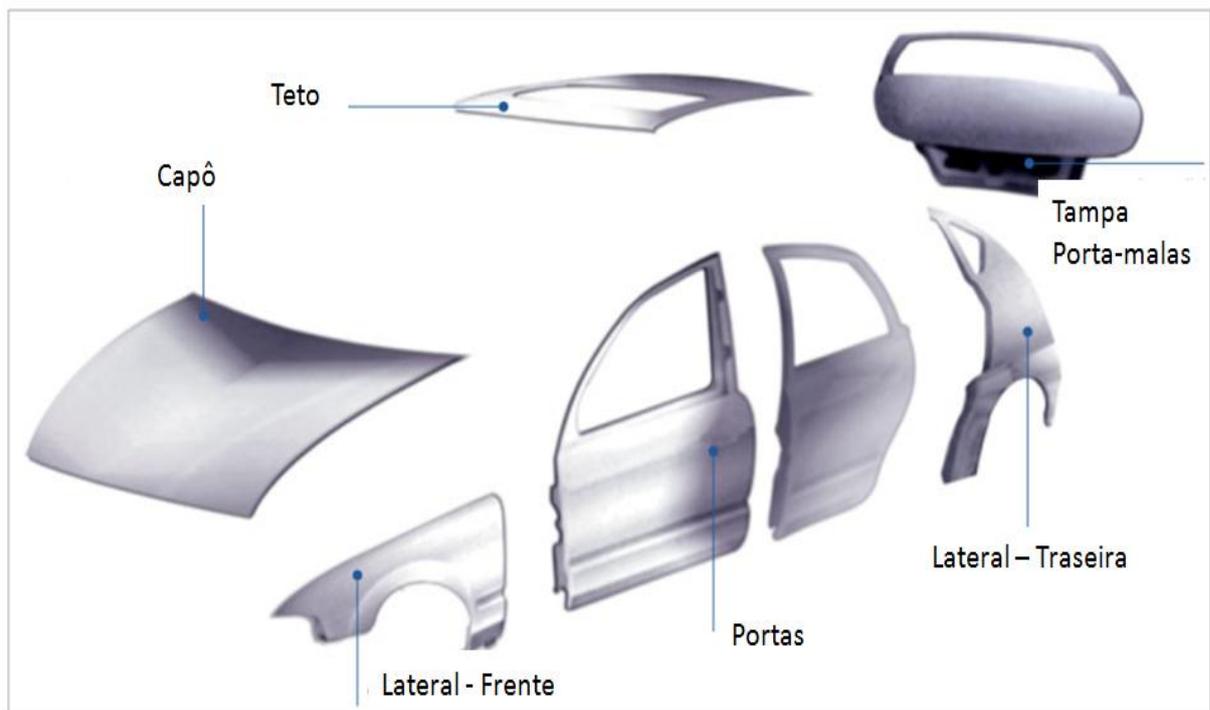


Fonte: EAA (2013), adaptado.

Diferentes partes da estrutura exigem diferentes processos de fabricação. Por exemplo, partes para sustentação dos eixos e do motor devem ser feitas de alumínio fundido (nº 3), a estrutura em geral pode ser feita por laminação (nº 1), as vigas de ligação do teto, bem como o suporte para os bancos devem ser feitos por extrusão (nº 2). Todos esses processos serão detalhados em capítulo posterior deste trabalho, sobre a produção primária do alumínio.

É possível demonstrar, conforme análise da figura 4, que um carro pode possuir praticamente toda sua estrutura de revestimento externo composta de alumínio. O capô, teto, portas e porta-malas, para-lamas dianteiro e traseiro são alguns exemplos de possibilidades para utilização do alumínio nos carros.

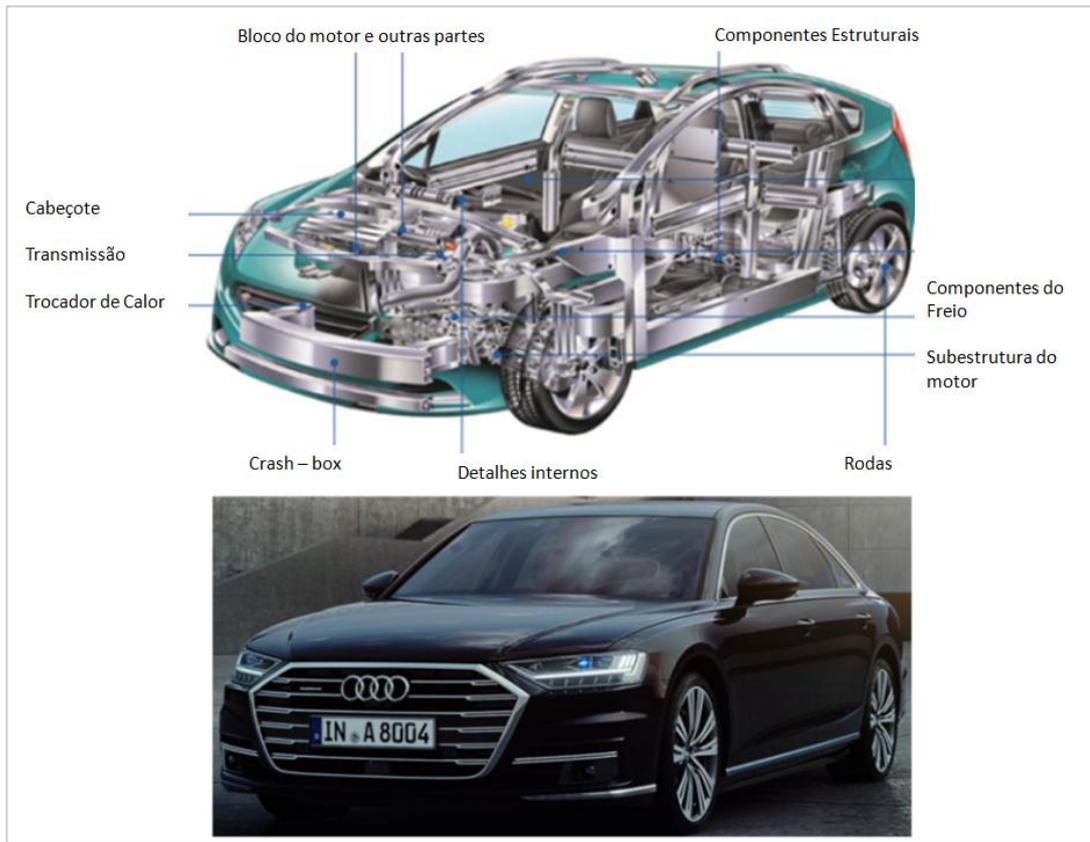
**Figura 4 - Estrutura Externa do Veículo em Al**



Fonte: EAA (2013), adaptado.

Já na figura 5, ilustra-se o conceito de um AIV, em que praticamente toda parte estrutural, motopropulsora e de revestimento possuem altas porcentagens de alumínio em suas ligas. O modelo apresentado, Audi A8, possui mais de 500 kg de alumínio em sua composição total (EAA, 2013), esse fato demonstra que, embora ainda seja uma realidade onerosa do ponto de vista financeiro, os AIVs já estão presentes no mercado.

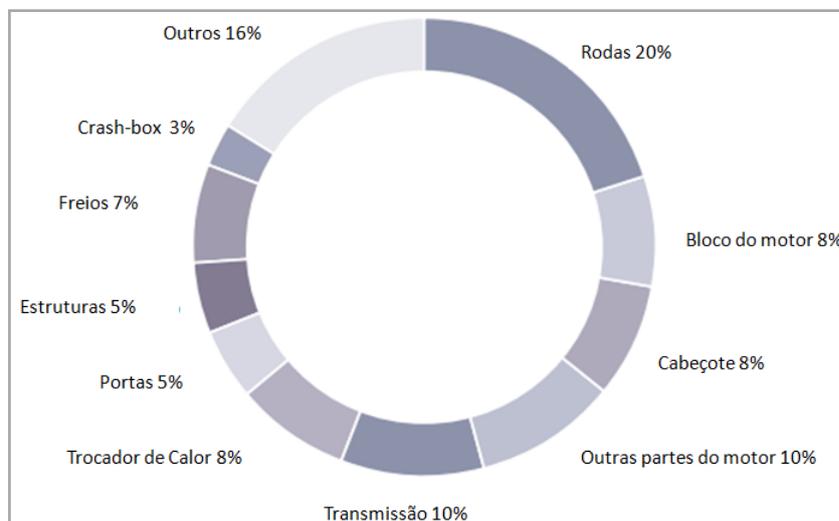
**Figura 5 – Conceito de AIV (Aluminum Intensive Vehicles)**



Fonte: EAA (2013) ; AUDI (2018), adaptado.

Por fim, no gráfico da figura 6, são ilustradas as porcentagens médias dos principais componentes com alumínio em um veículo nos dias de hoje. Pode-se perceber que as rodas, diversas partes do motor, além da transmissão e radiador são os itens de maior utilização do alumínio (EAA, 2013).

**Figura 6 – Percentual de Utilização do Al nos Carros**



Fonte: EAA (2013), adaptado.

## 2.2 As Rotas de Produção do Alumínio

Existem duas maneiras de obtenção do alumínio: a primeira é pela extração direta de recursos naturais, através da mineração da bauxita. A segunda é por meio da reciclagem do próprio metal. Portanto, ambas são denominadas produção primária e produção secundária, respectivamente. Nesta seção serão tratados, de maneira resumida e holística, os principais aspectos de cada uma dessas rotas de produção. Esse estudo tem sua eminente importância pois, posteriormente, os dois processos serão analisados através do método científico Análise do Ciclo de Vida (ACV), existente na literatura. Além disso, a ferramenta Análise do Modo de Falha e seus Efeitos também será aplicada diretamente ao ACV em questão. Portanto, é fundamental a compreensão global das diferentes características de produção do alumínio, uma vez que esses conceitos serão aplicados ao longo de todo o trabalho.

### 2.2.1 A Produção Primária do Alumínio

A produção de alumínio primário começa com a extração do minério de bauxita, uma rocha vermelha semelhante à lama seca. Essa rocha (figura 7), de aspecto barroso, é encontrada em diversas reservas ao redor do mundo.

De acordo com o Centro de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (US GEOLOGICAL SURVEY, 2006), o Brasil é o terceiro país do mundo em reservas de bauxita com 12% das reservas mundiais, ficando atrás apenas da Guiné, na África, com 26% e da Austrália, na Oceania, com 21%. Não obstante, quando se trata de produção do minério, ou seja, da prática da mineração em si, a China ocupa o segundo lugar com 21% do minério de bauxita extraído no mundo, ficando a Austrália na liderança com 30% e o Brasil em terceiro lugar com apenas 14%.

**Figura 7 – Rocha de Bauxita**



Fonte: HYDRO (2018).

A análise desses dados, em princípio, pode parecer um tanto quanto contraditória. Pode-se questionar, como a China seria o segundo maior minerador de bauxita do mundo e o Brasil, mesmo possuindo maiores reservas, ainda estaria atrás dos asiáticos nesse quesito. Uma das possíveis explicações para esse fenômeno, além de questões político-industriais, é que o Brasil possui altas taxas de reciclagem de alumínio em alguns setores (latas de bebidas, por exemplo), o que faz com que o ritmo de extração de nossas reservas possa ser diminuído. Esse fato por si só, mostra o poder econômico que a reciclagem sistêmica em diversas esferas de produção pode causar em um país. Tema este, que será abordado em capítulo posterior deste trabalho.

Segundo Paraskevas *et al.* (2016), o alumínio é um dos materiais mais intensivos em termos de demanda de energia e, de acordo com o Instituto Internacional do Alumínio (IAI, 2018a), exigiu um consumo médio de 804.375 Giga Watt hora (GWh) para a produção mundial em 2016. O processo de produção primária do alumínio será descrito abaixo em sua sequência de etapas, de acordo com um resumo de diversas fontes bibliográficas.

#### Etapa 1: Mineração

Primeiramente, é preciso que uma larga camada de solo, composta por rochas e argila seja removida. Esse é o primeiro passo da mineração que, concomitantemente, já causa o primeiro impacto ambiental (desmatamento e poluição visual). A bauxita é então removida e transportada para a usina, onde será lavada e britada, antes de ser transportada para o refino (HYDRO, 2018). O segundo impacto desse processo é a lama resultante que é depositada nas bacias de rejeitos. É consenso entre as maiores mineradoras de alumínio que para se produzir uma tonelada de alumina, necessita-se de aproximadamente 2 a 3 toneladas de bauxita. Esse dado empírico obriga que as refinarias estejam próximas as minas de exploração por questões práticas e econômicas da relação de peso bauxita / alumina.

Um ponto importante da mineração como um todo, conforme já citado anteriormente, é a disposição de seus rejeitos. O desaguamento dos rejeitos ganhou uma conotação técnica de relevância, infelizmente, justificada pelos últimos acidentes ocorridos no país. Nesse contexto, o incremento de segurança nos sistemas de disposição torna-se um ponto vital no processo e a indústria mineral necessita repensar suas estratégias na alocação desses resíduos. É clara e notória a necessidade de se reduzir a quantidade de água associada à questão, reduzindo, assim, a dependência de barragens.

Nesse contexto, Pedrosa (2012) afirma que a forma mais utilizada atualmente para a disposição de rejeitos é por meio do acondicionamento em barragens de contenção,

mediante técnicas de aterro hidráulico. Os rejeitos são transportados por gravidade ou por bombeamento, através de tubulações até as barragens. Em geral, estes rejeitos são dispostos em grandes diques, conforme mostrado na figura 8, permitindo a sedimentação dos sólidos e a formação de um sobrenadante alcalino, adjacente à planta industrial.

**Figura 8 – Barragem de Rejeitos**



Fonte: Pedrosa (2012)

Diante desse cenário, Pedrosa (2012) disserta que é necessária a adoção de alternativas capazes de catalisar o processo de sedimentação e adensamento dos rejeitos em reservatórios, além de promover um desaguamento prévio dos mesmos. Essa situação é necessária pois, durante o beneficiamento da bauxita, os minerais de ferro e titânio não se dissolvem em meio alcalino, constituindo um rejeito fino conhecido como lama vermelha. Além disso, outro rejeito proveniente desse processo é o resíduo direto da deslamagem, com a simples liberação de frações argilosas incorporadas. A composição química da lama vermelha varia extensamente e depende da natureza da bauxita, além da técnica empregada no processo Bayer de cada planta industrial. Desse modo, o autor disserta que uma opção interessante é a submissão de tais rejeitos ao ressecamento, expondo-os à ação direta das condições climáticas locais e da drenagem. Nesse sentido, obtém-se uma grande contração volumétrica dos produtos finais estocados, por meio da retirada da água via drenagem e por evaporação. Essa técnica de disposição envolve o lançamento da lama em reservatórios ou baias de grandes dimensões, de forma a garantir a evolução dos processos

de sedimentação e adensamento sob o próprio peso, realizando a drenagem de fundo. Como consequência, há a formação de uma camada de água sobrenadante, que deve ser mensurada antes do lançamento da camada seguinte. A espessura da lâmina d'água é função das taxas locais de drenagem e de evaporação. Com a eliminação continuada da água superficial, tem início o processo de contração tridimensional e a consequente formação de trincas de ressecamento.

Todavia, o método tem suas limitações, como a demanda por extensas áreas de disposição, elevados custos de terraplenagem e influência sazonal sobre o processo. Contudo, ainda é considerado uma opção mais segura, uma vez que a probabilidade de falha por mecanismos de ruptura é baixa quando comparada aos grandes reservatórios. Além disso, a possibilidade de recuperação da água sobrenadante para o processo industrial o faz uma alternativa ambientalmente mais sustentável. Na figura 9, ilustra-se a concentração de lama por ressecamento e a ausência de formação de reservatório de água.

**Figura 9 – Disposição por Ressecamento**



Fonte: Pedrosa (2012)

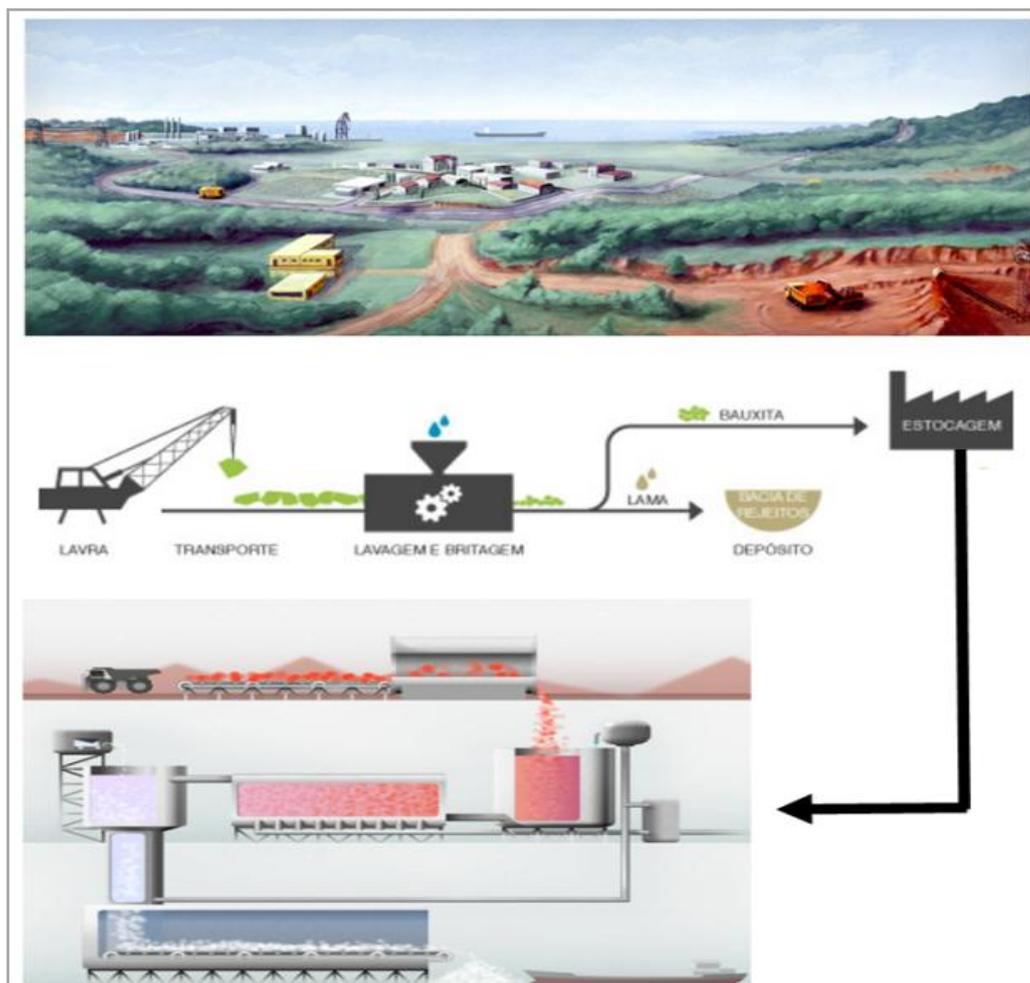
### Etapa 2: Refinaria – Produção de Alumina

Após ser lavada e britada, a bauxita, já em disposta em fragmentos menores, passa por um processo de refinamento, a fim de se obter o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), popularmente conhecido como alumina. Trata-se de um pó alvíssimo, extremamente abrasivo que, para ser obtido em seu estado puro, necessita que diversos processos químicos ocorram. Esse conjunto de etapas para a obtenção da alumina, é chamado de processo Bayer, em homenagem ao cientista austríaco Karl Josef Bayer, inventor do procedimento em 1877 (IAI, 2018b). Em suma, pode-se dizer que, ao se produzir alumina, o processo para a produção

do alumínio também contribui para o fornecimento de matéria-prima, que não o Al, para diversas outras cadeias produtivas. Ou seja, a alumina pode ser aplicada na fabricação de materiais refratários, na floculação para o tratamento de água, em produtos abrasivos como lixas, na fabricação de velas de ignição, etc (ABAL, 2018b).

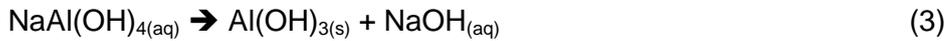
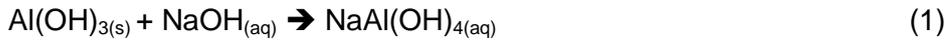
De acordo com o *International Aluminium Institute* (IAI), o processo Bayer consiste no principal e mais econômico método para a produção da alumina. Após o processo de moagem, a bauxita é imersa em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a uma temperatura de aproximadamente 150 °C, numa fase denominada digestão. A soda cáustica reage com o óxido de alumínio e este passa para um estado de solução aquosa que, posteriormente, será decantado num processo de precipitação. A alumina é, então, lavada e aquecida para a remoção da água. O material precipitado é filtrado, para remover e recuperar a solução cáustica. Todo o restante é eliminado por filtragem e a alumina é seca até atingir a forma de pó branco. Essas etapas são ilustradas por meio da figura 10:

**Figura 10 – Mineração da Bauxita e Produção de Alumina**



Fonte: IAI (2018b); HYDRO (2018); (IAI, 2018c), adaptado.

Em resumo, as equações químicas do processo são descritas abaixo (IAI, 2018c):



### Etapa 3: Redução do Alumínio

Segundo Peruzzo e Canto (2012), a redução é um processo eletroquímico inverso à oxidação. Pode-se reduzir um material quando se tem um funcionamento básico de uma cela galvânica (pilha) ou também por eletrólise. Esta, trata-se de uma reação química inversa a pilha, pois o processo não gera corrente elétrica, mas sim, precisa dela para ocorrer. Eis o motivo pelo o qual, conforme já citado, o alumínio é um dos materiais mais intensivos em termos de demanda de energia elétrica, ele se utiliza da redução eletroquímica em um processo denominado Hall-Hérault. Segundo a Abal (2018b), são necessárias duas toneladas de alumina para se produzir uma tonelada do metal primário via redução. Abaixo, segue a equação química (5) que rege o processo (IAI, 2018d):

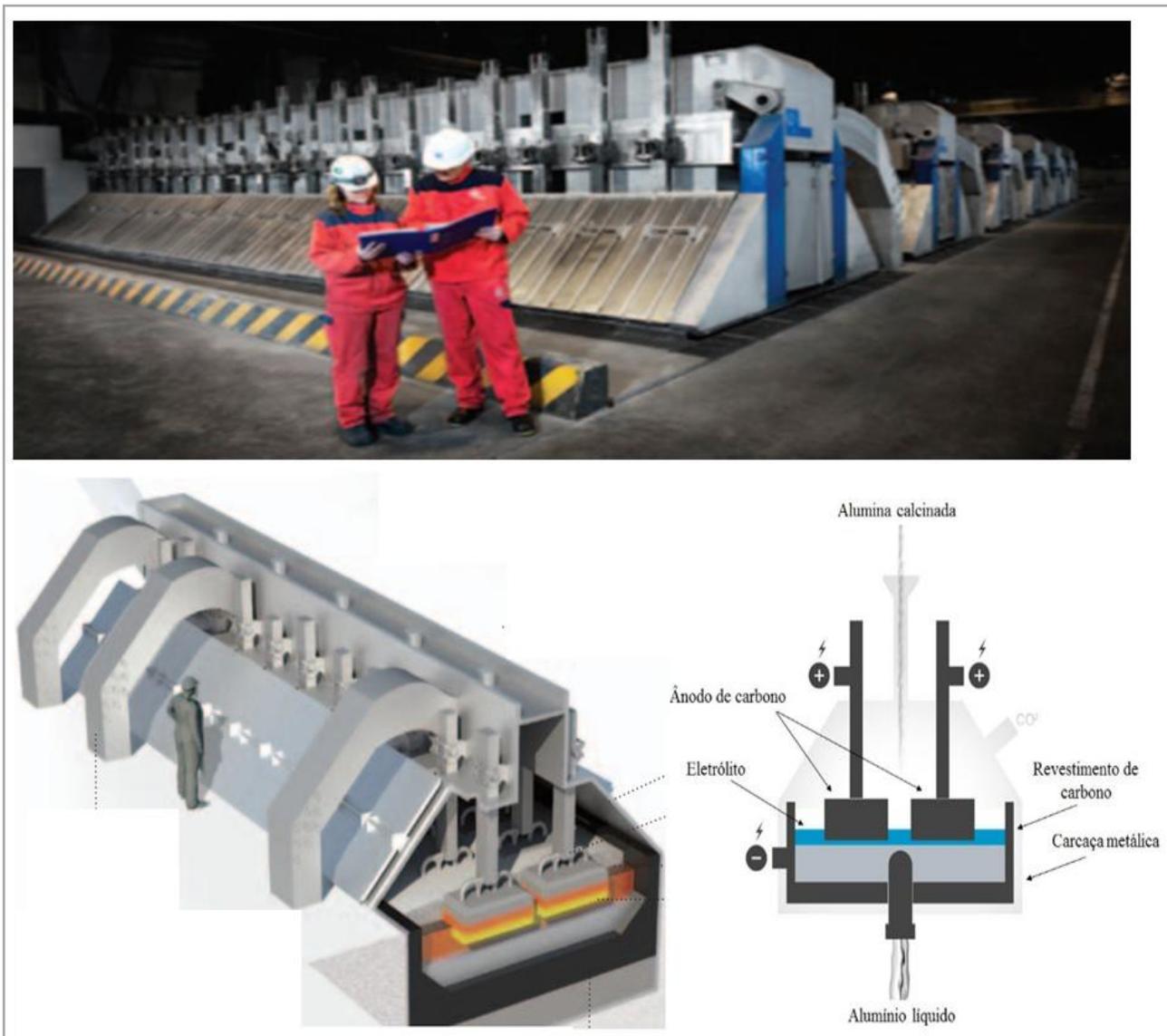


A chave desse procedimento se encontra nos dois átomos de alumínio que estão ligados aos oxigênios formando a alumina. É necessária grande quantidade de energia elétrica para quebrar essa ligação e se conseguir o metal puro. Analisando a equação, percebe-se que sob as devidas circunstâncias operacionais o oxigênio se liga ao carbono do polo positivo (anodo), formando  $\text{CO}_2$ , enquanto o alumínio reduz no catodo (polo negativo) decantando no fundo do forno (em forma líquida). Todas essas etapas, mostradas na figura 11, ocorrem a  $960^\circ\text{C}$  em uma solução de sais fundidos (eletrólito) (HYDRO, 2018a).

Após resfriado existem três principais maneiras de moldagem do metal, todas já citadas na Figura 3, são elas:

- a) Extrusão
- b) Fundição
- c) Laminação

**Figura 11 – Redução: Processo Hall Herot**



Fonte: HYDRO (2018a); adaptado.

- **Extrusão:** É um processo de transformação termomecânica no qual um tarugo de alumínio é reduzido em sua seção transversal quando forçado a fluir através do orifício de um maquinário, sob o efeito de altas pressões e temperaturas. A variedade de perfis que podem ser extrudados em alumínio é praticamente ilimitada. O processo possibilita a obtenção de seções mais resistentes pela adequada eliminação de juntas frágeis e uma melhor distribuição de metal. Entre os principais tipos de produtos resultantes desse processo estão perfis sólidos e tubulares. Suas aplicações são ideais para os setores de construção civil, bens de consumo, indústria elétrica e transportes (ABAL, 2018c.);

- **Fundição:** É um dos primeiros processos industriais utilizados na produção de artigos de alumínio. A fundição em alumínio pode ser feita por gravidade, com uso de um molde metálico. As peças fundidas de alumínio têm suas principais aplicações na área automotiva e de transportes. Pode-se citar, por exemplo: blocos de motor, cabeçotes, caixas de câmbio, carcaças e rodas para automóveis e veículos pesados, entre outros (ABAL, 2018c.);
- **Laminação:** É um processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal por compressão do metal, por meio da passagem entre dois cilindros de aço ou ferro fundido com eixos paralelos que giram em torno de si. Os principais tipos de produtos laminados são: chapas planas ou bobinadas, folhas e discos. Esses semimanufaturados têm diversas aplicações em setores como transporte, construção civil e bens de consumo. Encontra-se o alumínio laminado em carrocerias para carro e ônibus, elementos estruturais, telhas, fachadas, calhas, rufos, embalagens (latas de bebida, descartáveis), painéis e utensílios domésticos, etc. (ABAL, 2018c.).

Nas aplicações industriais o alumínio é entregue, em sua grande maioria, como matéria-prima já manufaturada em três formatos, tarugo, rolo caster (bobina) e lingote, conforme ilustrado, respectivamente, na figura 12:

**Figura 12 - Tarugo, Rolo Caster, Lingote**



Fonte: o autor.

### 2.2.2 A Produção Secundária do Alumínio

A produção de alumínio secundário é todo e qualquer processo que envolva a obtenção do metal como forma de matéria-prima via reciclagem. Logo, nessa rota de produção a cadeia não mais começa pela mineração da bauxita, mas sim pela coleta de material que porventura virá a ser reciclado.

Atualmente, existem no Brasil e no mundo inúmeras cadeias de reciclagem do alumínio já bem estabelecidas e atuantes de forma sistêmica. Quando se atinge o nível de escala industrial de reciclagem, esta passa a ser definida como um ciclo fechado de produção - *closed loop* (LIU e MÜLLER, 2012). Trata-se de um processo de economia circular em que o produto ao ser descartado passa por uma série de etapas constituintes do ciclo de produção e retorna ao mercado como o mesmo produto que outrora foi descartado.

Um bom exemplo desse processo, no caso brasileiro, é a reciclagem de latas de bebida. Segundo dados da ABAL (2016), o país é líder mundial no setor, reciclando uma faixa de 98% do total produzido, ou seja, praticamente toda sua produção de latas de alumínio. No ano de 2016, foram recicladas 280 mil toneladas de sucata de latas de alumínio o que injetou cerca de R\$ 950 milhões de reais na economia nacional. Um fato interessante, de acordo com dados da associação, é que em aproximadamente 60 dias, uma lata de alumínio pode ser comprada, utilizada, coletada, reciclada e envasada voltando às prateleiras para o consumo. Trata-se de um exemplo empírico dos benefícios da economia circular, do ciclo fechado de produção, bem como de uma cadeia de reciclagem sistêmica. Os esforços desempenhados por fabricantes de chapas, de latas, cooperativas e recicladoras, além de amplo apoio governamental, por meio da conscientização da população, garantem uma experiência de sucesso com grande influência social, econômica e ambiental. Esse resultado é fruto da conjugação de vários aspectos. O principal deles é o fato de o país possuir um mercado de reciclagem já estabelecido em todas as suas regiões. Além disso, a facilidade na coleta, transporte e venda somados ao alto valor da sucata de alumínio, estimularam a reciclagem das latas no país, provocando também mudanças no comportamento do consumidor (ABAL, 2016).

Outra fonte de alumínio secundário é a reciclagem automotiva. Conforme já citado anteriormente, um dos objetivos deste trabalho é comparar as duas rotas de produção do metal utilizado nos carros. Portanto, a próxima seção será dedicada exclusivamente ao tema da reciclagem automotiva. Espera-se que, após serem feitas as devidas análises e comparações, seja possível determinar quais seriam os benefícios da implantação de uma cadeia de reciclagem sistêmica do alumínio voltado para essa indústria.

### **2.3 A Reciclagem Automotiva**

Esta seção aborda temas importantes inerentes à reciclagem de um carro. Desde que um processo sistêmico seja bem estabelecido, uma enorme quantidade de materiais pode ser reutilizada ou reciclada. Diversos estudos já foram realizados e constam na literatura científica sobre o tema. Por exemplo, Reis (2015) realizou pesquisa sobre o papel do cobre nos ELVs, Quadra (2015) trata da reciclagem de polímeros no ciclo de vida dos automóveis

além de Modaresi e Müller (2012), que publicaram um estudo sobre o alumínio reciclado nos automóveis. A seção será dividida em 3 subpartes, sendo a primeira uma perspectiva da reciclagem veicular no mundo, em seguida, o cenário brasileiro quanto à questão e, por fim, um resumo do processo de reciclagem em si.

### 2.3.1 A Reciclagem Automotiva Mundo

Segundo dados da International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA, 2017), foram produzidos, aproximadamente, 73 milhões de carros no mundo durante o ano de 2017. Desde 2009, a frota mundial de veículos ultrapassou a marca de um bilhão de unidades em uso (OICA, 2017), um número expressivo que ainda tende a crescer com o passar dos anos. Uma consequência natural desse crescimento da frota mundial são os ELVs, que aumentam sua quantidade paralelamente ao aumento da produção de veículos novos. Alguns países no mundo já se preocupam com essa situação, a exemplo dos EUA, Japão e várias nações da União Europeia que já adotaram a reciclagem de veículos de forma sistêmica. Existem diferentes critérios e leis para caracterizar a condição de fim de vida de um carro, contudo o ponto em comum é a possibilidade de detectar a existência dessas leis regulatórias para viabilizar o processo de reciclagem de veículos. Ademais, é natural que um veículo sofra uma depreciação de mercado à medida que se caminha para a condição de ELV. O valor econômico referente ao peso dos materiais constituintes do carro representa apenas 2% do valor inicial do veículo novo, mostrando uma necessidade de aumentar a valorização desses materiais através de processos bem estruturados de reciclagem (CASTRO, 2012).

A seguir, são mostrados os dados dos principais países no mundo que possuem processos de reciclagem sistêmicos dos veículos em fim de vida útil:

- União Europeia

De acordo com FORTES (2008), a Comunidade Europeia possui algumas diretrizes que regulam a reciclagem de veículos. Dentre elas, pode-se citar a Diretiva 2000/53/CE (*European Parliament and the Council, 2000*) que, desde 2001, data em que foi aprovada, exige que as montadoras europeias se responsabilizem pelo ciclo de vida dos seus veículos além de estabelecer metas de reciclagem. Além disso, devem desenvolver o mercado de materiais reciclados junto a fornecedores de matérias-primas e componentes automotivos. Segundo Belboom *et al.* (2016), a União Europeia trabalha anualmente com aproximadamente cerca de 9 milhões de toneladas de resíduos provenientes de ELVs, 6% de sua frota anual é reciclada. A Lei 2000/53/EC determina que até 2015, 95% da massa desses automóveis deve ser recuperada. Com isso, um de seus principais objetivos é

diminuir o impacto ambiental e energético, contribuindo dessa maneira para um desenvolvimento sustentável. Dados recentes, de acordo com o portal de estatísticas da União Europeia, Eurostat, revelam que até 2016, ano da realização do último levantamento, a taxa de reciclagem global de massa nos veículos europeus estava pouco acima dos 85%, demonstrando que a meta da diretiva 2000/53/EC ainda está em andamento (EUROSTAT, 2019) e passa por revisões.

- Estados Unidos

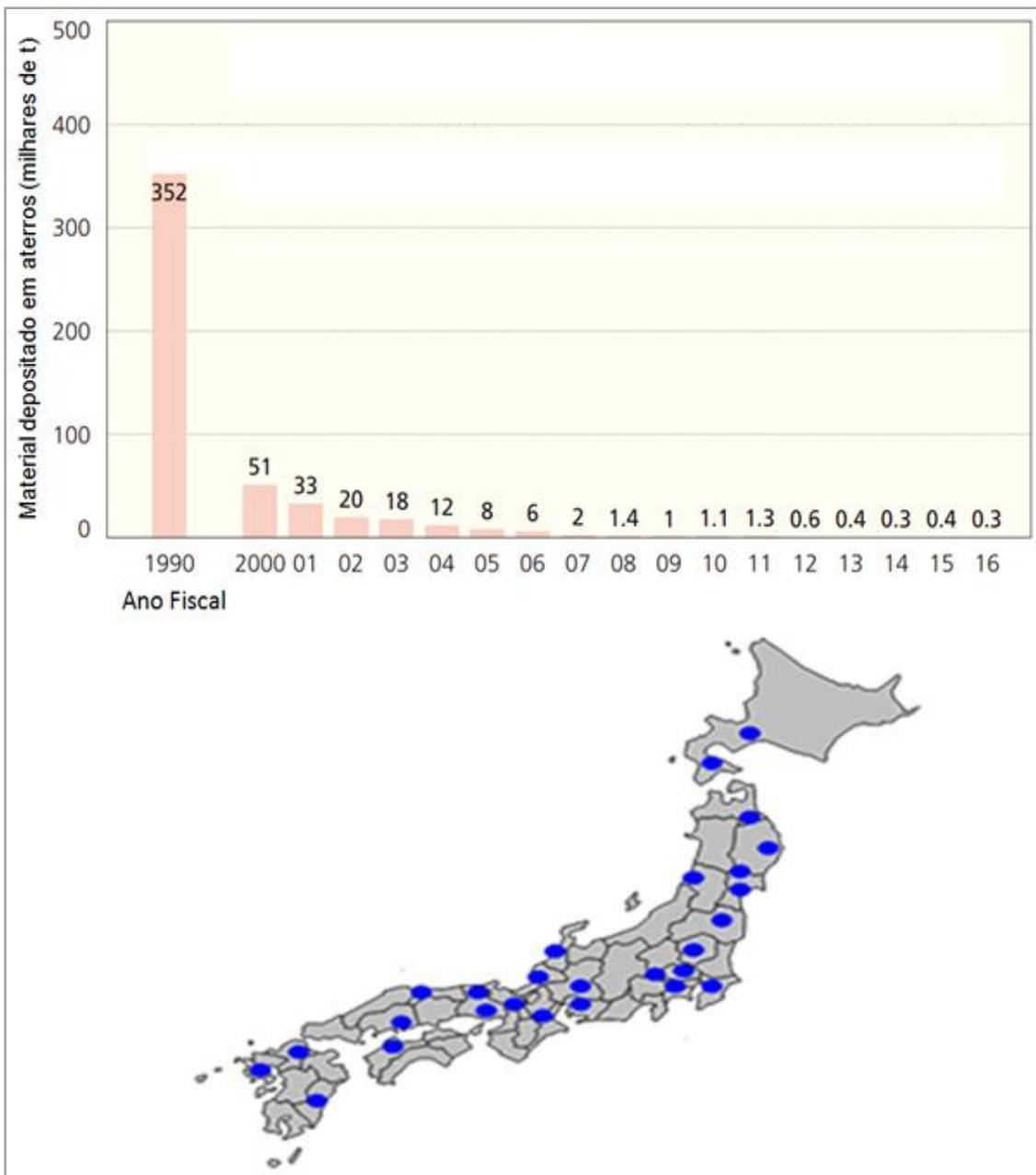
Os EUA possuem uma frota de aproximadamente 250 milhões de veículos, dentre os quais 14 milhões são reciclados anualmente, ou seja, um valor percentual (5,6%) muito próximo do valor europeu (FORTES, 2008). O país não possui legislação específica sobre reciclagem de carros, contudo conta com leis estaduais e municipais que são, em alguns aspectos, relacionadas com o tema. Nacionalmente, conta com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*EPA – Environmental Protection Agency*) que regula questões referentes a resíduos perigosos, aterros sanitários e estabelece metas de reciclagem para diversos produtos. Existe uma lei, NHTSA-2009-0120, que regula a troca de veículos velhos por veículos novos (NHTSA, 2009). Trata-se de um programa de incentivo para redução do consumo de combustível, que prevê descontos para pessoas interessadas na troca do veículo, a fim de se ter um carro mais econômico e, conseqüentemente, causar um menor impacto ambiental. Em 1943, foi fundada a Associação de Empresas de Reciclagem de Veículos (*ARA – Automotive Recycling Association*) que, atualmente, possui mais de 1000 empresas associadas que trabalham com o governo em prol da elaboração de diretrizes e leis relacionadas ao tema. Em termos gerais, 95% dos ELVs são reciclados no país, contudo apenas 75% do peso do veículo é aproveitado. Somente 30% desse total são novamente reaproveitados pela própria indústria automobilística (CASTRO, 2012).

- Japão

Entre os países citados, o Japão merece destaque, uma vez que lá surgiu um novo conceito na reciclagem de veículos, denominado Indústria Venosa e Indústria Arterial (CASTRO, 2012). Nesse conceito, o sistema no qual são fabricados produtos por meio da extração primária de matérias-primas recebe a denominação de Indústria Arterial, enquanto aqueles que entram no processo por meio do seu fim de vida e são novamente processados através da reciclagem, recebem o nome de Indústria Venosa. Também no Japão foi criado o IREC (*International Recycling Education Center*), um centro de educação visando o aprimoramento de técnicas e processos de reciclagem de veículos, servindo de exemplo para o mundo. A Lei que regula a reciclagem de ELVs, de acordo com o ministério do meio

ambiente japonês (MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, 2003), entrou em vigor em 2005 e, segundo Hiratsuka (2014), a meta, em um primeiro momento, era atingir um percentual de recuperação de no mínimo 95% da massa do carro (componentes e materiais) até 2015. Dados estatísticos da Associação de Automóveis do Japão (*Japan Automobile Manufacturers Association, JAMA*) demonstram que as metas para a reciclagem de ELVs foram atingidas já no ano de 2008, tornando o país referência mundial ao se tratar de uma cadeia sistêmica de reciclagem automotiva (JAMA, 2018). Na figura 13, essa situação é ilustrada, além de se mostrar um mapa estratégico da reciclagem no país asiático.

**Figura 13 – Redução de Resíduos Depositados & RUM Alliance - Japão**

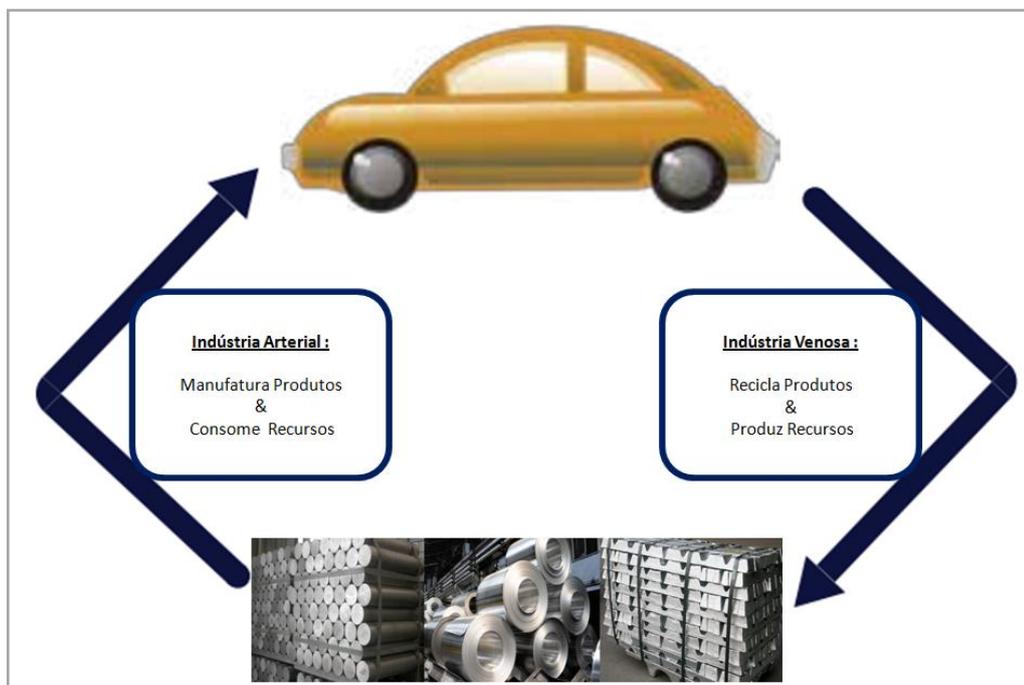


Fonte: Jama (2018); Rum Alliance (2018), adaptado.

O exemplo da RUM Alliance (*ReUse Motorization Alliance*), uma espécie de associação de empresas com o fito exclusivo da reciclagem automotiva, ratifica a ideia e o êxito japonês. Pode-se perceber, ao se analisar a figura 13, que essa associação cobre praticamente todo o território do país, além das impressionantes taxas de redução dos resíduos automotivos depositados em aterros desde a implementação da lei.

Baseado nessa política, de acordo com Castro (2012), o Japão desenvolveu o seu próprio modelo de reciclagem veicular, reciclando em torno de 3 a 4 milhões de carros por ano no país. Esse valor corresponde a um total de 4,4% da frota japonesa e representa um importante cenário industrial, mercadológico e social para os asiáticos. A figura 14, ilustra o conceito de indústria venosa e arterial.

**Figura 14 - Conceito de Indústria Venosa e Arterial**

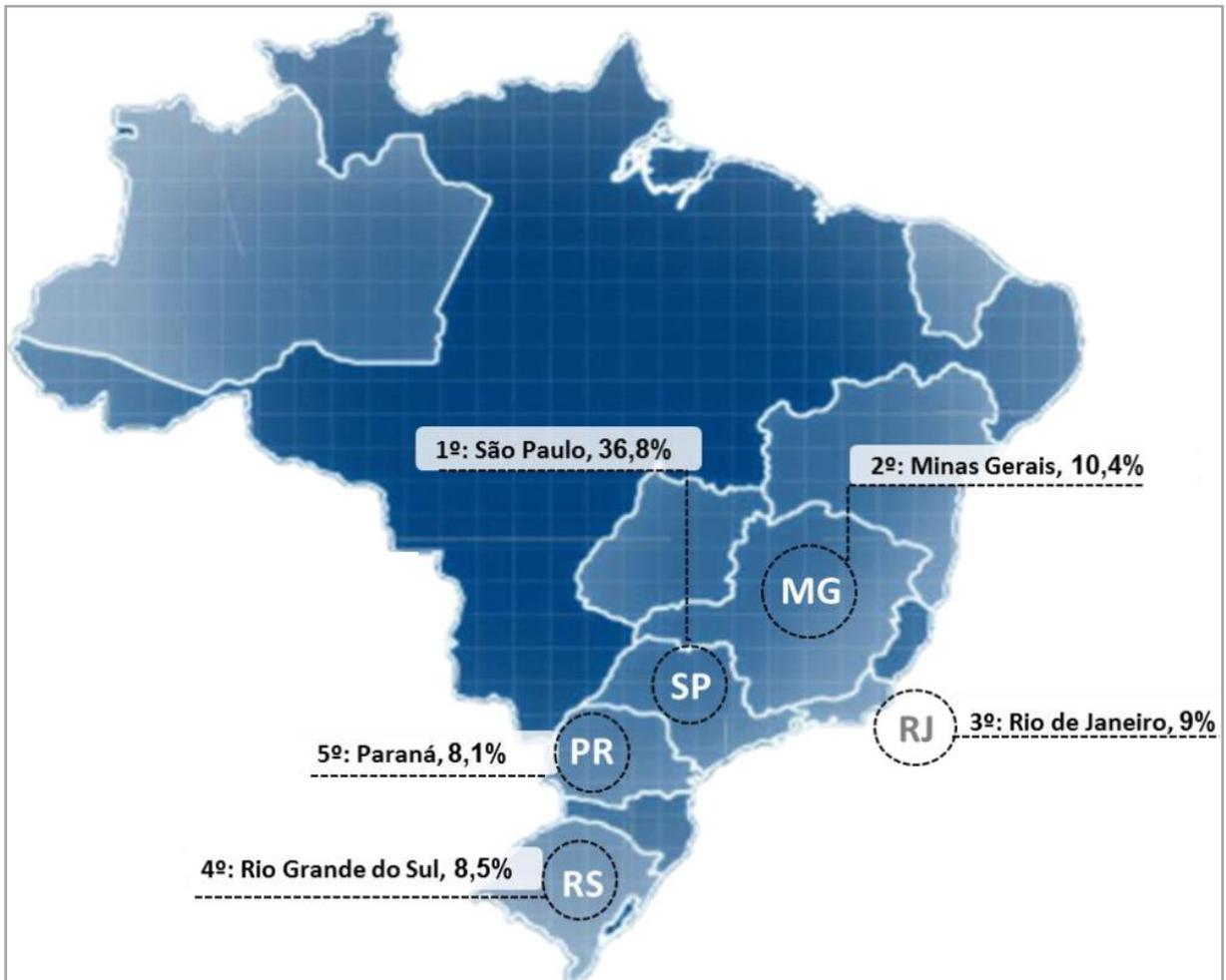


Fonte: Castro (2012), adaptado.

### 2.3.2 A Reciclagem Automotiva no Brasil

Atualmente, a frota de carros no Brasil é de aproximadamente 64 milhões, considerando apenas automóveis do tipo passeio, caminhonetes e caminhonetas (IBGE, 2017). De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (AFAVEA, 2017), 2,7 milhões de carros foram produzidos no Brasil no ano de 2017. Por sua vez, esses veículos estão distribuídos em todo território nacional, existindo uma concentração de aproximadamente 73% em apenas cinco estados (SP, MG, RJ, RS e PR). Conforme demonstrado na figura 15, São Paulo é o estado com maior número de veículos, apresentando 36,8% da frota nacional (SINDIPEÇAS, 2018).

**Figura 15 – Distribuição de Veículos por Estado**



Fonte: Sindipeças (2018).

Considerando os veículos em fim de vida útil, o Brasil não possui um sistema adequado que permita a disposição ambientalmente correta desse tipo de produto. Grande parte dos veículos terminam em pátios dos Departamentos de Trânsito de cada estado, os quais estão em geral lotados, como mostrado na figura 16, além de aterros clandestinos que também são utilizados para esse fim. A solução para esse problema seria a reciclagem dos veículos com o manuseio e destinação adequada de seus diferentes resíduos, afim de se evitar potenciais impactos ao meio ambiente (MARQUES e CASTRO, 2016).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil (PNRS) é uma lei federal que determina a responsabilidade compartilhada dos usuários, fabricantes, importadores e distribuidores para a gestão e manejo dos resíduos ao longo do ciclo de vida dos produtos. Em suma, essa lei prevê a criação de instrumentos de planejamento e gerenciamento de resíduos sólidos em nível nacional, estadual e municipal (PNRS, 2010). Nessa linha de raciocínio, encaixam-se a Lei Federal do Desmonte (LEI 12.977, 2014) e a Lei do Estado de

São Paulo sobre a destinação e reciclagem dos ELVs (LEI 15.276, 2014), ambas voltadas aos problemas causados pelos veículos em fim de vida útil. A Lei do Desmonte define “a atividade de desmonte ou destruição de veículo, seguida da destinação das peças ou conjunto de peças usadas para reposição, sucata ou outra destinação final”. Além disso, tanto a Lei 12.977, quanto a Lei 15.276, determinam que as atividades de desmanche e comercialização de peças devem ser realizadas por empresas devidamente registradas e fiscalizadas por órgãos de trânsito de cada estado.

**Figura 16 - Pátio do DETRAN em MG**



Fonte: Jornal Estado de Minas (2016).

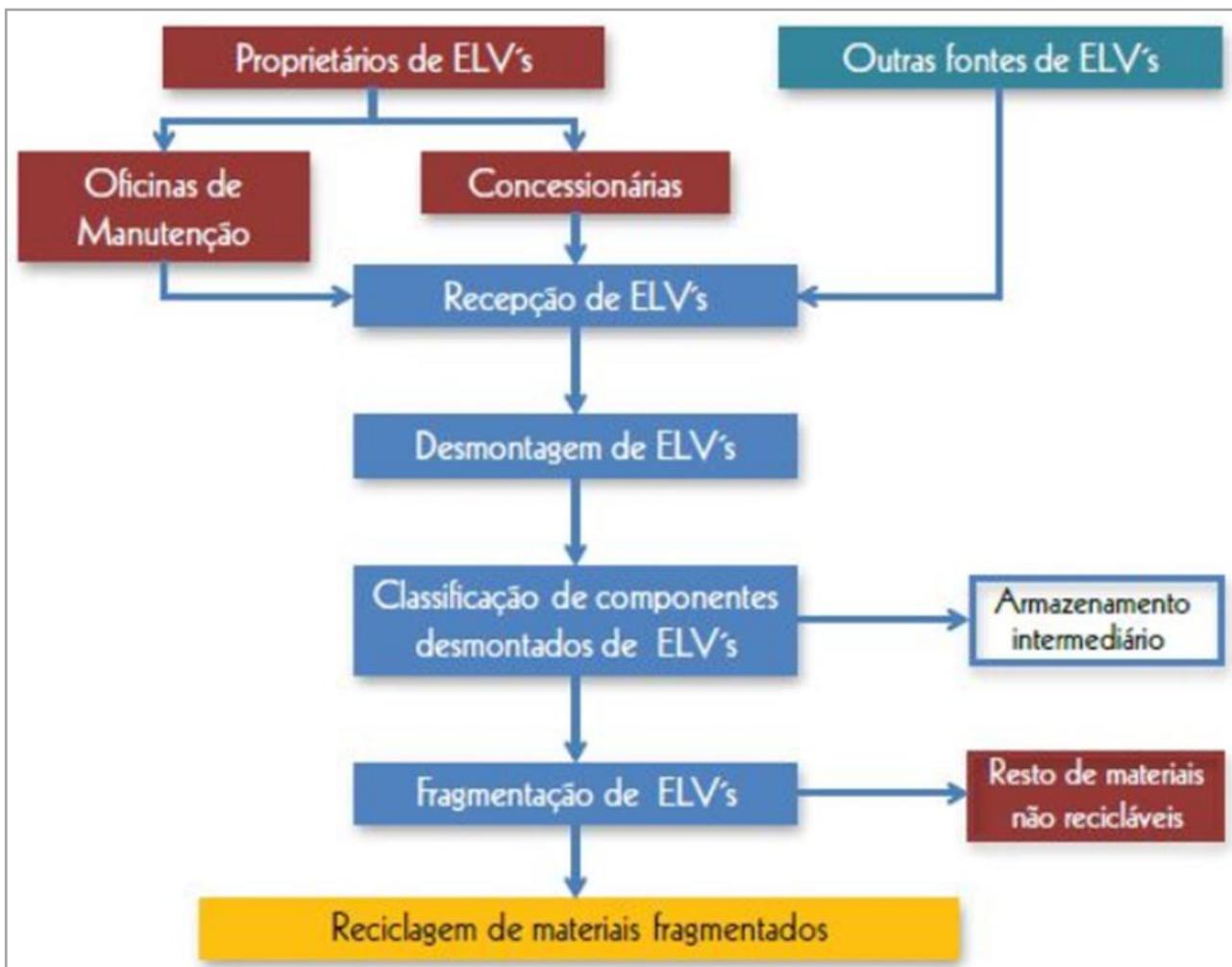
Segundo Castro (2012), ao se tratar da reciclagem de veículos no Brasil, é preciso mencionar a quantidade significativa de roubos e desmanches ilegais de veículos para a retirada de peças, que são comercializadas de forma ilegal no mercado paralelo em escala nacional. Ainda, o autor afirma que as próprias companhias de seguros alertam para a grande quantidade de fraudes envolvendo veículos, o que tem por consequência um mercado criminoso estimado em aproximadamente cinco bilhões de reais. Apenas as fraudes relacionadas aos seguros de veículos representam um valor de 5% do total de irregularidades neste mercado. Trata-se de um cenário de violência consuetudinária que está vinculada à proliferação de desmanches ilegais e à prática de furtos e roubos de veículos.

### 2.3.3 O Processo de Reciclagem de um Veículo

Conforme já citado anteriormente, o Japão é referência mundial na reciclagem de veículos. Logo, este trabalho valer-se-á do método japonês para uma explicação resumida das principais fases do processo.

Para se alcançar a máxima eficiência, foi desenvolvida uma sequência de etapas, de modo que é possível o reaproveitamento de praticamente todos os seus componentes e materiais de forma eficiente e ecológica. Estima-se que, com esse método, considerando em conjunto a reciclagem e a reutilização de materiais, o Japão já consegue reaproveitar 99% do peso de um ELV (HIRATSUKA, 2014). Na figura 17, serão descritas as etapas necessárias para a reciclagem veicular, de acordo com o livro “Reciclagem e Sustentabilidade na Indústria Automobilística”, do autor Daniel E. Castro e resumido por Marques (2016).

**Figura 17 - Fluxograma com as etapas da reciclagem veicular**



Fonte: Castro (2012).

### 1ª Etapa: recepção dos ELV's

Áreas bem estruturadas são destinadas para receber os veículos que serão reciclados. Esse local deve ser apropriado de modo que os carros possam ali permanecer até que seja iniciado o processo de descontaminação, conforme ilustrado na figura 18 (1).

### 2ª Etapa: descontaminação e remoção dos dispositivos de segurança

O processo de descontaminação, mostrado na figura 18 (2), consiste na retirada de todos os fluidos presentes no automóvel, incluindo o combustível remanescente no tanque, óleos dos sistemas de freio e direção, além dos gases do sistema de ar condicionado. Todas essas substâncias são recolhidas por empresas responsáveis para o correto descarte ou reciclagem. Os dispositivos de segurança não podem ser reutilizados sob nenhuma hipótese. Portanto, esses componentes são acionados e retirados do carro, dentre os quais estão o sistema de freio, air bag e cintos de segurança.

### 3ª Etapa: desmontagem dos ELVs e classificação dos componentes

Essa etapa é realizada manualmente por técnicos, trata-se do inverso do processo realizado nas montadoras durante a fabricação do veículo. Após o processo de desmontagem, os componentes são etiquetados e classificados. Aqueles que se encontram em boas condições são comercializados de forma legal como peças de reposição. Com base na inspeção, os componentes que não atendem a um nível de qualidade, devem ser encaminhados para a etapa de fragmentação. Figura 18 (3).

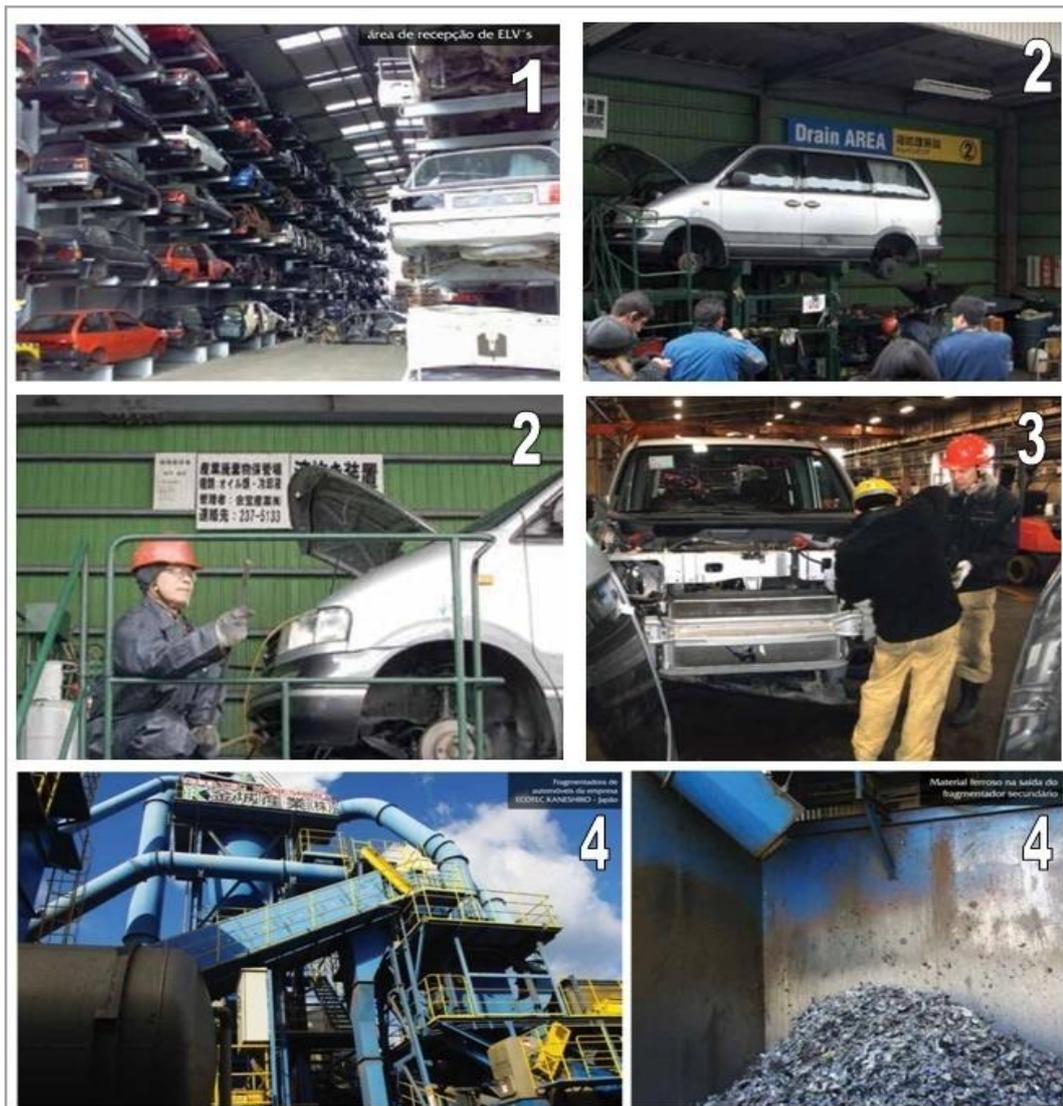
### 4ª Etapa: fragmentação dos ELV's

Nesse processo ocorre a fragmentação dos componentes que não foram aproveitados nas etapas anteriores. Partes como a carroceria, materiais metálicos, plásticos e outros tipos de materiais são triturados. Após a fragmentação, processos de separação são utilizados para distinguir materiais. Um subproduto desse processo é o chamado ASR (*Automotive Shredder Residue* ou resíduo automotivo de trituração) constituído principalmente por plásticos, borrachas e pequenas partículas metálicas. Segundo PASSARINI (2013), a cada uma tonelada de ASR encontra-se aproximadamente 6,5 kg de Al. Contudo, esses resíduos são depositados em aterros representando um dos principais impactos ambientais relativos ao processo de reciclagem veicular e fazem com que a reciclagem integral (100%) do automóvel não seja alcançada. Os ASR podem ser tratados por meio de processos de reciclagem térmica e têm sido utilizados no Japão como fonte energética através de processos de incineração com rigoroso controle dos gases formados durante o processo (ZHAO, 2011). Figura 18 (4).

### 5ª Etapa: reciclagem dos materiais fragmentados

Essa etapa consiste na reciclagem propriamente dita e ocorre quando um material fragmentado se transforma em um novo material em sua forma original. Esse é o cenário ideal para que se tenha a maior efetividade e o maior aproveitamento do produto, evitando perdas no processo e garantindo a qualidade da peça que será futuramente produzida. Por exemplo, um pistão de motor composto por uma liga de alumínio seria utilizado para produzir outro pistão com a mesma liga, mantendo suas características e propriedades. Mais uma vez, aqui incorre o conceito de *closed-loop* e economia circular, descrito por Liu e Müller (2012). Paralelamente, restos de outros componentes fragmentados como plásticos e similares podem ser queimados sob forma controlada ou encaminhados para empresas especializadas, onde ocorrerá a sua reciclagem.

**Figura 18 - Etapas da Reciclagem no Japão**



Fonte: Castro (2012), adaptado.

## 2.4 A Análise do Ciclo de Vida (ACV)

Com o acelerado crescimento econômico mundial e consequente aumento da produção em praticamente todos os setores, é cada vez maior a preocupação ambiental e energética. O desenvolvimento de metodologias capazes de avaliar e quantificar os diversos impactos relacionados aos processos de produção, produtos e serviços é de importância cada vez mais estratégica nas sociedades modernas. Uma ferramenta que vem sendo utilizada com essa finalidade é a chamada Análise do Ciclo de Vida (ACV). Segundo Marques (2016), trata-se de uma técnica capaz de avaliar as diversas variáveis associadas ao ciclo de vida de um produto, ou seja, todas as etapas de sua vida desde a sua criação, passando por uma sequência intermediária até a sua destinação final. Essas variáveis podem ser o consumo de energia elétrica, a emissão de CO<sub>2</sub>, a quantidade de resíduos sólidos produzidos, o consumo de água, etc. Atualmente, utiliza-se a elaboração de inventários da produção do produto em questão. Esses inventários são tabelas descritivas e quantitativas sobre os tipos de materiais, recursos energéticos e emissões necessários para se produzir uma determinada quantidade do produto. Para fins deste trabalho, a ACV deve considerar os fatores relacionados à produção de uma tonelada de alumínio para a indústria automotiva.

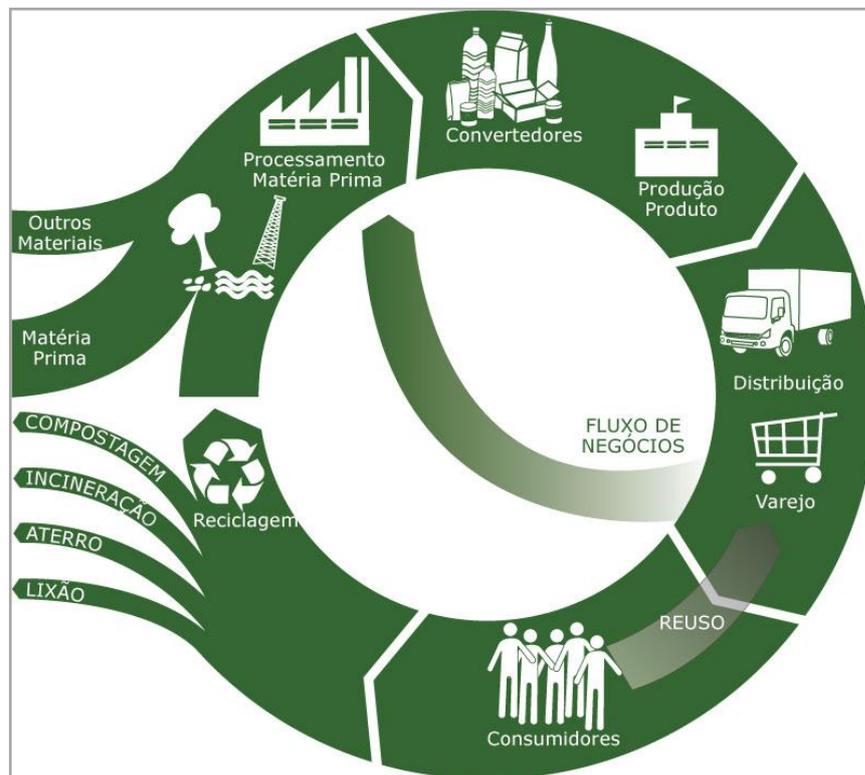
### 2.4.1 Um Breve Histórico da ACV

A metodologia da Análise do Ciclo de Vida surgiu no final da década de 60 e uma de suas primeiras publicações foi sobre requisitos energéticos para produção de produtos químicos (CURRAN, 2006). Mas a fundamentação para os presentes métodos de ACV surgiram no início dos anos 70, quando empresas de refrigerantes fizeram análises de inventários sobre qual tipo de embalagem teria o menor impacto quando descartada, qual afetaria menos a fonte de matéria prima, além de quantificar cada uma dessas matérias e o combustível necessário para transportá-las até os processos de manufatura das embalagens (GUINEE, 2011). Quando a questão do descarte de lixo sólido se tornou um problema de nível mundial na década de 80, a ACV surgiu novamente como ferramenta de análise de problemas ambientais. Segundo Curran (2006), em 1991, houve uma preocupação sobre alguns usos inapropriados da ferramenta para fazer falsas propagandas de certos produtos industrializados. O caso fez com que a ACV se tornasse uma metodologia padronizada pela *International Standards Organization* (ISO) com o surgimento das normas da série 14000 (ISO, 97). A partir de então, a ACV começou a ser utilizada como ferramenta de pesquisa, tornando-se comum suas citações em artigos científicos de jornais como o *Journal of Cleaner Production*, *Environmental Science & Technology*, *Journal of Industrial Ecology* (GUINEE, 2011).

### 2.4.2 O Conceito da ACV

Pode-se dizer que qualquer produto a ser consumido tem um ciclo de vida, que é representado por todas as etapas de sua produção. Isso abrange desde a sua criação, passando por uma sequência de etapas intermediárias até sua destinação final. Nesse ponto, é preciso estabelecer processos de reciclagem para que o ciclo possa ser realimentado, evitando, assim, o descarte inadequado. Nesse contexto, o ciclo de um produto inicia-se com a extração da matéria-prima que o constitui. No caso deste trabalho, tem-se a mineração da bauxita como marco inicial. As etapas intermediárias relacionam-se aos processos de transformação dessa matéria-prima no produto final e sua posterior utilização, conforme descrito no item 2.2. A figura 19 ilustra de forma holística o conceito do ciclo de vida de um produto aleatório.

**Figura 19 - Conceito do Ciclo de Vida de um Produto Aleatório**



Fonte: Braskem (2018).

Segundo Rebitzer *et al.* (2004), a quantificação de impactos é um passo necessário para se alcançar o desenvolvimento sustentável. Nesse raciocínio, novas metodologias capazes de avaliar os impactos relacionados a processos, produtos ou serviços foram desenvolvidas. Norgate e Haque (2010) dissertam que entre as metodologias já desenvolvidas, aquela que tem mais ganhado eminência e credibilidade no meio científico é a Análise do Ciclo de Vida (ACV). Os autores definem a ACV como uma ferramenta capaz de avaliar os impactos

ambientais, econômicos e energéticos de várias atividades e produtos de forma objetiva e sintética.

Nesse sentido, Yellishetty *et al.* (2009) argumentam que a ACV é a melhor metodologia no quesito sustentabilidade para diversos setores industriais, incluindo mineração. Esse é um ponto importante, que justifica-se na aplicação direta da ACV como meio de análise quantitativa na comparação das rotas de produção do alumínio para este trabalho.

Ainda, alguns autores, a exemplo de Goleman (2015), consideram a ACV como um meio para começarmos a compreender melhor a degradação do planeta. O pesquisador cita o exemplo de uma simples jarra de vidro que leva inúmeros passos distintos para ser produzida. A Análise do Ciclo de Vida seria capaz de demonstrar os múltiplos impactos de cada etapa produtiva, desde as emissões atmosféricas até possíveis efeitos na saúde humana. Além disso, Goleman (2015) defende fielmente que todas as plataformas industriais utilizem o pensamento sistêmico da ACV, pois trata-se de uma imensa oportunidade empreendedora para o futuro. Adicionalmente, é sugerido que a metodologia se torne uma disciplina escolar e seja incorporada ao currículo das escolas desde a educação básica.

Basicamente, de acordo com as normas regidas pela ISO 14040 (ISO,1997) uma ACV deve ser composta por, primeiramente, uma definição de objetivos e escopo do trabalho. Nessa etapa são feitos fluxogramas e as fronteiras do sistema são definidas (entrada e saída de materiais, energia, poluentes, etc.). Em segundo lugar, é feito um inventário do processo, este é elaborado na forma de tabela com as informações quantitativas referentes à produção do produto desejado, em função de uma unidade funcional pré-definida. Essa unidade, de acordo com Rebitzer *et al.* (2004), atua como um parâmetro de comparação entre diferentes processos de produção para um mesmo produto. Neste trabalho, por exemplo, será utilizada a unidade funcional de 1 tonelada de alumínio, seja ela produzida pela rota primária ou secundária. Assim, tem-se um objetivo comum de produção que pode ser comparado mediante a elaboração desses inventários. Em um terceiro momento, faz-se a avaliação de todos os impactos envolvidos e, conseqüentemente, a interpretação dos dados.

É importante salientar que, em uma interpretação usual de uma ACV, é difícil quantificar a partir dos resultados quais impactos são mais significativos no processo, uma vez que existem diversos tipos de materiais envolvidos, com diferentes volumes, massas e unidades. Assim, por exemplo, um resíduo gasoso pode ter um menor volume de emissão que um resíduo líquido ou sólido no sistema analisado, contudo seu impacto ambiental pode ser muito maior, visto que sua contenção é praticamente inviável na natureza. Dessa forma, é

muito difícil definir ações de priorização que permitam minimizar os impactos mais significativos em termos de sustentabilidade global dos processos somente a partir da análise convencional da ACV. É exatamente visando à solução desse problema, que a ferramenta FMEA pode vir a ser utilizada.

## 2.5 A Análise do Modo de Falha e seus Efeitos (FMEA)

A FMEA é uma metodologia científica que prioriza os modos de falha (ou simplesmente falhas) de um produto e / ou processo. A ferramenta utiliza-se de conceitos relacionados aos riscos de cada um desses modos de falha ocorrer. Assim, ela é normalmente utilizada no meio industrial para qualificar defeitos em componentes, sistemas de produção ou projetos antes mesmo que eles possam acontecer. A maioria dos autores, entre eles Fogliatto e Ribeiro (2009), definem duas abordagens relacionadas à FMEA: uma é orientada para projetos e outra para processos. Segundo Cicek e Celik (2013), a ferramenta FMEA surgiu em 1949 e foi utilizada pelo Exército dos EUA para avaliar falhas em sistemas de armas. No entanto, foi somente nos anos 60 e 70 que essa ferramenta começou a ser usada de forma sistêmica, especialmente na indústria aeroespacial (LIU *et al.* 2013).

Para o desenvolvimento de uma FMEA, associa-se a cada modo de falha já estabelecido, três índices de risco chamados: severidade, ocorrência e detecção. Essas três dimensões são avaliadas em uma escala que varia de 1 a 10. Finalmente, um parâmetro de risco global é definido para cada modo de falha, denominado de RPN (*Risk Priority Number*). Este número é definido como o produto matemático entre os três índices definidos anteriormente. Para uma melhor elucidação teórica, um resumo de cada um dos índices é mostrado a seguir:

- Índice de Severidade (IS): de acordo com Liu *et al.* (2013), este parâmetro é avaliado mediante o grau de importância de uma possível falha, ou o quão severa ela é. Por exemplo, o defeito no sistema de freio em um carro, deve receber uma qualificação 10 (numa escala de 1 a 10, em que 1 é o menos severo e 10 o mais severo) para o preenchimento de uma planilha FMEA. Esse valor é atribuído, pois além de comprometer o funcionamento da máquina (carro), essa falha incorre a riscos aos usuários.
- Índice de Ocorrência (IO): Segundo Jong *et al.* (2013), o índice de ocorrência está relacionado à frequência que um modo de falha pode ocorrer. Assim, em um processo industrial qualquer, se uma determinada falha ocorre a cada intervalo de uma hora, essa falha deve receber um alto valor de IO, pois sua ocorrência é constante e o interstício pequeno. É possível a elaboração de tabelas com o intuito

de quantificar e padronizar as ocorrências das falhas, sendo que se uma falha é extremamente rara, ela receberia um (IO) = 1. Por outro lado, um defeito que constantemente ocorre, ou seja, possui uma alta frequência e um curto intervalo de tempo, receberia um (IO) = 10.

- Índice de Detecção (ID): este índice está relacionado à facilidade de uma falha ser detectada. Nesse sentido, Cicek e Celik (2013), dissertam que, quanto mais fácil for a detecção de um defeito, menor seria o índice atribuído a ele. Esse conceito é importante pois a classificação, agora, funciona de maneira inversa as anteriores, ou seja, aquela falha claramente perceptível em uma máquina (um pneu furado, por exemplo), receberia um (ID)=1, enquanto que um ruído interno na válvula de escape de motor a combustão, deveria receber um alto índice de (ID).
- Risco Global (RPN): o fator de risco global (RPN - *Risk Priority Number*) é obtido pela multiplicação simples dos três índices anteriores, ou seja,  $RPN = (IS) \times (IO) \times (ID)$ . A partir desse resultado, o RPN indica o nível de prioridade de cada uma das falhas analisadas em uma escala de 1 a 1000. Quanto mais crítico for esse defeito mais próximo de 1000 será o valor do RPN. Logo, é possível estabelecer diferentes graus de prioridade, a fim de que ações preventivas ou mesmo de manutenção possam ser tomadas.

Na figura 20, ilustra-se um exemplo de planilha FMEA a ser preenchida de acordo com as especificações de um processo.

**Figura 20 – Modelo de Planilha FMEA para um Processo**

FMEA - Análise de Modos de Falhas e Efeitos								
Componentes da Equipe:			Tipo de FMEA:			Processo Analisado:		
Líder:	Revisor:							
Empresa:	Setor:	Data de Início:	Data da Revisão:	Data da entrega:				
Documentos Anexos:				Nº do Documento:				
Função do Processo	Componentes	Modo de Falha	Efeitos do modo de falha	Possíveis Causas do modo de falha	IG	IO	ID	RPN

Além do objetivo principal da FMEA, ela também poderia ser utilizada como uma ferramenta capaz de avaliar as mudanças tecnológicas, bem como comparar sistemas alternativos, concentrando-se no ponto de vista de seu risco (HOSEYNABADI, 2010). Essa capacidade de avaliar tecnologias é um dos fatores responsáveis pela escolha da FMEA para este estudo. Trata-se de uma das ferramentas que será utilizada para comparar as duas rotas de produção do alumínio. Apesar de ser uma metodologia já consolidada e amplamente utilizada, a FMEA tem suas limitações. É possível dizer que, de acordo com Hoseynabadi (2010), a análise do modo de falhas e efeitos possui uma certa subjetividade durante o processo de taxaço dos índices. Isso faz com que a qualidade da FMEA dependa muito do conhecimento da equipe que a conduz, sendo que o nível de precisão dos resultados está diretamente relacionado ao conhecimento dos participantes envolvidos. Ademais, Liu *et al.* (2013) explicam algumas limitações sobre os índices (IO), (IS) e (ID), uma vez que não há distinção de importância entre eles e todos possuem o mesmo peso no cálculo final do RPN. Nos próximos capítulos, será explicado como a FMEA foi aplicada neste trabalho.

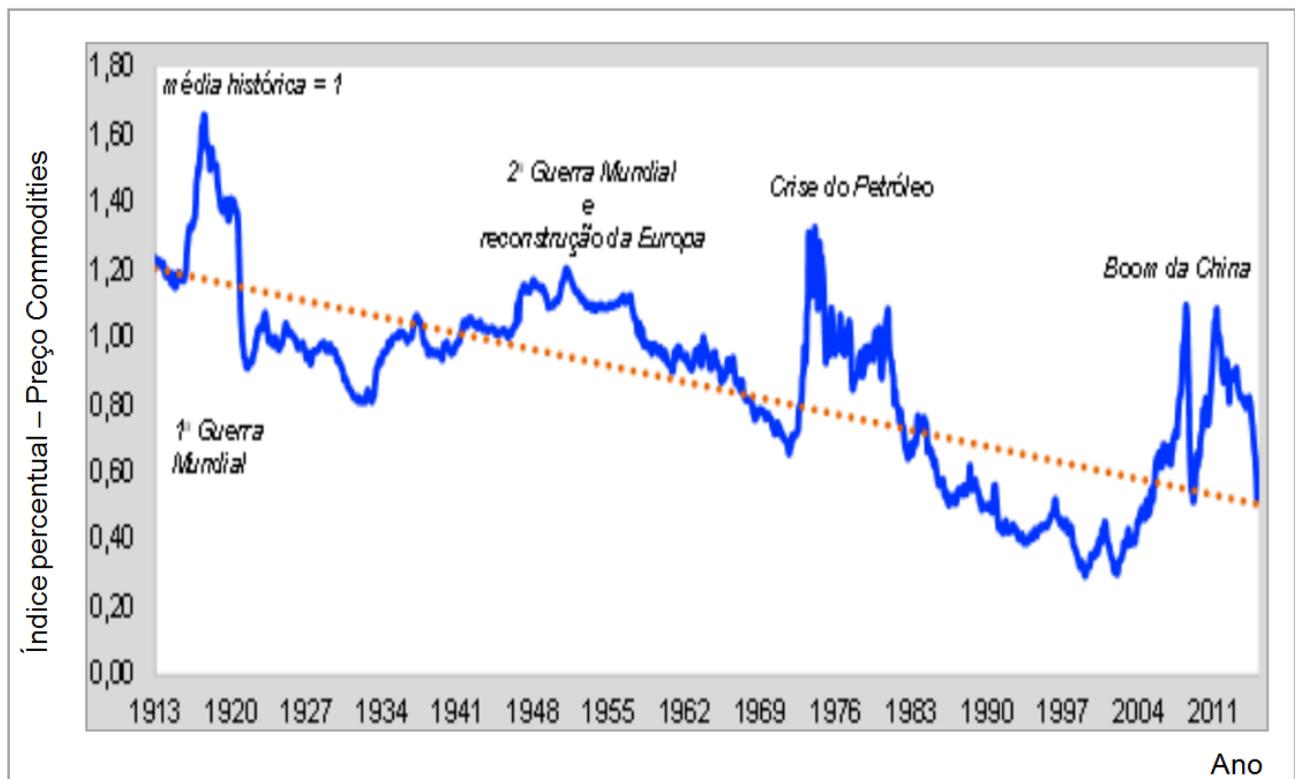
### 3. MACROECONOMIA E SUSTENTABILIDADE

Este capítulo destina-se a uma análise macroeconômica da sustentabilidade mundial. Os conceitos aqui tratados serão aplicados diretamente aos dados disponíveis relativos à produção de alumínio e seus efeitos perniciosos ao meio ambiente, bem como sua importância para a economia. Além disso, esse estudo demonstra o papel da eficiência energética nesse processo, podendo ela mitigar ou mesmo intensificar os impactos ambientais.

#### 3.1 Conceitos Macroeconômicos

Segundo Holanda (2010), a macroeconomia é um ramo de aplicação da Teoria Econômica em que leva em conta fatos observados no mundo real como um todo. Temas importantes como o crescimento econômico, a determinação de preços das commodities, o valor das moedas e o papel dos governos na economia, são apenas alguns dos fatores envolvidos nesse conceito. Para ilustrar a situação, a figura 21 mostra a evolução geral do preço médio das commodities (petróleo, minerais e agrícolas), em dólar, na economia mundial dos últimos 100 anos. O ponto de partida é 1913 e os valores foram deflacionados pelo índice de preços ao consumidor dos EUA.

**Figura 21 – Preço das Commodities no século XX - início XXI**



Fonte: ITAÚ (2015).

Ao analisar a figura 21, percebe-se que em 1913 o preço médio das commodities encontra-se, aproximadamente, 20% acima da média histórica. O gráfico demonstra quatro ciclos de forte alta nos preços, são eles: - O primeiro, que inicia-se em 1915, estaria associado à 1ª Guerra Mundial, o subsequente coincide com a segunda grande guerra, indo desde a ascensão do Nazismo, na década de 30, até a reconstrução da Europa em meados dos anos 40/50. O terceiro ciclo de alta teria relação direta com a crise do petróleo na década de 70 e, finalmente, o último ciclo refere-se ao boom da China no início dos anos 2000 (ITAÚ, 2015).

Esse comportamento padrão, que pode ser claramente observado no gráfico da figura 21, encontra uma explicação baseada nos princípios da macroeconomia. Segundo Passos (2015), existe uma tendência de aceleração de demanda nos ciclos de alta nos preços, essa aceleração, por sua vez, incentiva os investimentos e estes aumentam a capacidade de produção. Quando esta crescente encontra-se com o fim de um ciclo de crescimento anormal da demanda, os preços tendem a cair por um longo período de tempo, até que o balanço entre oferta e demanda volte ao equilíbrio. Dos quatro ciclos apresentados, três se encaixam nesse conceito. Passos (2015) afirma que a exceção fica com a crise petrolífera da década de 70, que apresentou características insólitas, uma vez que sua alta iniciou-se devido a uma brusca queda na oferta do petróleo, o que levou ao repasse dos custos para as outras commodities. A análise do gráfico também permite a percepção de outras crises econômicas ao longo do século, como parte integrante desses ciclos. A década de 30 foi marcada pelo *crash* da bolsa em 1929, além de 2008, ano este em que uma crise econômica avassalou o sistema financeiro europeu e americano.

Em resumo, através de análises de dados macroeconômicos, é possível verificar situações gerais da economia, não se atendo a dados específicos ou pontuais. Para fins deste estudo, o gráfico da figura 21 fornece um dado alarmante: considerando as devidas correções monetárias, o preço médio das commodities diminuiu com o passar do século. Esse dado, a princípio, pode ser visto como algo economicamente positivo. O século XX, indubitavelmente, foi de extrema importância para a consolidação de avanços científicos da sociedade. Contudo, não se pode esquecer que essa diminuição de preços significa um incentivo a extração de recursos, em concomitância a uma desmotivação da reciclagem, além do aumento nas emissões atmosféricas. Em outros termos, a sociedade como um todo não vem atribuindo o devido valor ao material que, porventura, poderia ser reciclado, sendo, ainda, mais barato produzir um produto via extração de recursos naturais, que implementar uma cadeia produtiva de economia circular (*closed loop*), ou reciclagem sistêmica.

Além disso, outro importante índice de mensuração macroeconômica é o Produto Interno Bruto (PIB), que conta valores econômicos de consumo, investimento, despesas governamentais, exportações e importações (HOLANDA, 2010). Quando se pensa no bem-estar coletivo, é natural que se estabeleça uma ligação direta com o PIB per capita do país, ou seja, rendas pessoais mais altas naquele determinado lugar, refletem em uma melhor qualidade de vida. Todavia, de acordo com projeções da Organização das Nações Unidas (ONU), o mundo terá em 2050 aproximadamente 9 bilhões de pessoas (ONU, 2007). É plausível o questionamento de como um crescimento contínuo da economia proverá as necessidades básicas dessa população sem confrontar com os limites ambientais do planeta. A resposta que se tem até o momento, segundo Gadgil e Guha (1995), são ilhas de prosperidade em meio a oceanos de pobreza, em que os 20% mais ricos possuem 75% da renda econômica total do mundo.

Nesse raciocínio, é preciso distinguir dois importantes conceitos ambientais que estão intimamente ligados ao PIB: o descasamento absoluto e relativo. Por um lado, o descasamento relativo refere-se a uma diminuição de certa grandeza (ou recurso) por unidade de produção econômica. Por outro, a situação em que os impactos desses recursos declinam de maneira real é chamada de descasamento absoluto (JACKSON, 2013). Em síntese, considerando a questão ambiental, um descasamento relativo seria uma diminuição de impactos em relação ao PIB, enquanto que o absoluto seria uma redução real e prática da utilização/emissão daquele recurso ou impacto.

### **3.2 Conceitos de Sustentabilidade**

Uma vez que este trabalho aborda um tema de sustentabilidade ambiental, isto é, tornar um processo o menos nocivo ao meio ambiente, fazendo com que ele perdure o máximo de tempo possível, surge a questão quanto ao limite ecológico do planeta, que é finito. Jackson (2013) disserta que, se a economia do mundo está em constante crescimento e, por consequência, a extração de recursos naturais, é plausível prever uma era de escassez. Em suma, seria impossível pensar em um crescimento macroeconômico a longo prazo, sem encontrar com o ponto de inflexão dos limites ambientais.

Diante dessa perspectiva, de acordo com Usberco e Salvador (2006), o lixo como um todo produzido no Brasil não é tratado da maneira correta. Afirma-se que apenas a reciclagem não seria suficiente para resolver a questão dos resíduos industriais e domésticos produzidos diariamente no país. Nesse contexto, surgiu na década de 90, o conceito dos 3Rs. Trata-se de um conjunto de ações sustentáveis que podem ser aplicadas em todas as esferas da sociedade, no sentido de reduzir o consumo e, concomitantemente,

a produção de lixo, reutilizar tudo aquilo que pode ser reaproveitado antes de seu descarte final e, por fim, a execução da reciclagem em si.

A teoria dos 3Rs é ilustrada na figura 22. Apesar de serem conceitos semelhantes, os 3Rs possuem significativa diferença entre cada uma de suas diretrizes. É importante ressaltar que o conceito pode ser aplicado desde um único indivíduo até uma grande corporação industrial, ou seja, pode envolver a ampla e irrestrita participação da sociedade.

**Figura 22 – Conceito dos 3Rs**



Fonte: Silva e Komatsu (2014).

Nesse sentido, Silva e Komatsu (2014) dissertam que a redução é a primeira etapa desse processo. Ela consiste em ações que visam diminuir a produção de resíduos. Isso pode ser viabilizado por meio da minimização na fonte, ou seja, buscar alternativas para se reduzir o próprio consumo de material seja ele final ou de produção. Outra forma de se “reduzir”, é também mediante a eliminação do desperdício. É uma etapa importante, pois além de sua contribuição ambiental ela promove diminuição de gastos. Já o conceito da reutilização seria o segundo passo, há uma diferença tênue entre os conceitos de reciclar e reutilizar. Este envolve o simples ato de encontrar uma nova serventia para aquilo que, porventura, já não serve mais. A ideia de se reaproveitar um banco de automóvel como uma cadeira de escritório, conforme mostrado na figura 23, é um excelente exemplo da reutilização.

Por último, o conceito de reciclagem, segundo Usberco e Salvador (2006), consiste num processo de transformação em que o material reciclado se torna matéria-prima, que pode ser utilizada para produzir outros produtos ou o mesmo que a gerou. Na maioria das vezes, a reciclagem envolve um processo industrial e, para sua máxima eficiência, é fundamental

que exista uma correta e minuciosa separação dos diferentes materiais que serão reciclados. Essa situação foi ilustrada e descrita no capítulo 2, pela figura 16 e etapa 5, respectivamente.

**Figura 23 – Reutilização de Bancos**



Fonte: Castro (2012).

Nesse sentido, a incorporação do conceito 3Rs, em todas as esferas da sociedade, torna-se de cabal importância, visto que, de acordo com Jackson (2013), a demanda por extração de minerais está crescendo continuamente. Observando-se as taxas atuais, tem-se um tempo de exaustão em décadas, não em séculos. Ainda, existem alguns países que possuem uma taxa de extração exacerbada, a exemplo dos EUA, em que, se todos os países do mundo seguissem seu ritmo de exploração ambiental, minerais como cobre, zinco e prata, estariam exauridos em menos de 20 anos. Em relação ao alumínio, existe uma ponderada tranquilidade quanto ao seu tempo de extração, visto que dados revelam se tratar do terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo o oxigênio e o silício os dois primeiros, respectivamente. Ainda assim, há uma previsão de escassez para esse metal, que seguindo o ritmo de extração atual, não passaria dos cem anos (HYDRO, 2018).

Além desse possível sumidouro de recursos, outra preocupação eminente, segundo Jackson (2013), são as mudanças climáticas decorrentes da ação humana e aceleração do efeito estufa. Pode-se dizer que a capacidade de o clima absorver tamanha diferença de temperaturas, sem estabelecer uma mudança perigosa aos ecossistemas do mundo, está se acabando. Um importante estudo relacionado ao tema é o Relatório Stern, publicado pelo economista do Banco Mundial, Nicholas Stern (STERN, 2007). Nesse trabalho, o autor conclui que a ciência do clima deve ter como meta a estabilização das emissões de carbono na atmosfera em 450 partes por milhão (ppm). Isso poderia evitar uma mudança antropogênica do clima. Atingir essa meta, significa reduzir em 85% as emissões globais até 2050 (em termos de descasamento absoluto). Segundo Allen *et al.* (2009), as concentrações atmosféricas atuais já se encontram na faixa de 435 ppm. Isso significa que a economia global dispõe apenas de 1 trilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> a serem emitidos até 2050, para se ter uma chance que o aumento da temperatura média global seja inferior a 2 °C.

A mensagem que se pode extrair desses dados é clara: a mudança climática é perigosa, pode afetar diretamente todos os níveis tróficos do planeta Terra e, cedo ou tarde, ela será o ponto de inflexão de uma mudança inexorável nos valores da nossa sociedade.

### **3.3 Relação PIB x Eficiência Energética**

Conforme já visto, Jackson (2013) define o descasamento relativo como uma diminuição de utilização de recursos por unidade econômica. Em termos práticos, trata-se de se fazer mais com menos, ou seja, mais atividades econômicas com menos danos ao meio ambiente, mais produção de insumos e menos emissões atmosféricas, etc. Indubitavelmente, esse conceito tem uma relação direta com a eficiência energética. Pode-se dizer que essa é solução encontrada na contemporaneidade à questão paradoxal entre crescimento econômico e limite ecológico do planeta. Contudo, como será demonstrado em análise seguinte, essa filosofia tem sérias lacunas. As melhorias em termos da eficiência energética tem contribuído para um declínio das emissões, todavia, trata-se de um declínio relativo, em que muitas das vezes é superado pelo crescimento econômico e de produção. Evidências mostram que, em termos macroeconômicos, a busca contínua por eficiência é plenamente capaz de reduzir os custos de produção que, por consequência, causam um aumento nos lucros. Estes, por sua vez, agem no aumento da produção, que pode ou não superar as reduções energéticas providas pela eficiência. Um bom exemplo disso, segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças no Clima, é que o mundo, atualmente, gasta 33% menos energia do que em 1970 para se produzir uma mesma quantidade de material (IPCC, 2007). A questão é o quanto a mais de material vem sendo produzido.

Na figura 24, ilustra-se essa situação em termos algébricos. Supondo um crescimento econômico (refletido no aumento do PIB) de uma nação ao longo de um certo intervalo de tempo. Caso a taxa de emissão por unidade econômica para se produzir um determinado produto diminua nesse interstício, haverá uma redução relativa, ou seja, um declínio na taxa de emissão por produto fabricado ou, em outras palavras, um descasamento relativo nas emissões daquele gás. Entretanto, ainda fica a dúvida sobre quanto esse aumento no PIB provocou de aumento na emissão absoluta do gás, uma vez que uma elevação numérica do produto interno bruto refletiria diretamente no aumento da quantidade manufaturada do produto em questão.

**Figura 24 – Descasamento Relativo de Emissões**

O diagrama apresenta a fórmula  $D.R. = \frac{E}{\$}$ . O símbolo 'E' no numerador está dentro de um círculo azul. Duas setas cinzas apontam para baixo: uma à esquerda da igualdade e outra à direita do denominador, indicando uma redução na taxa de emissão por unidade econômica.

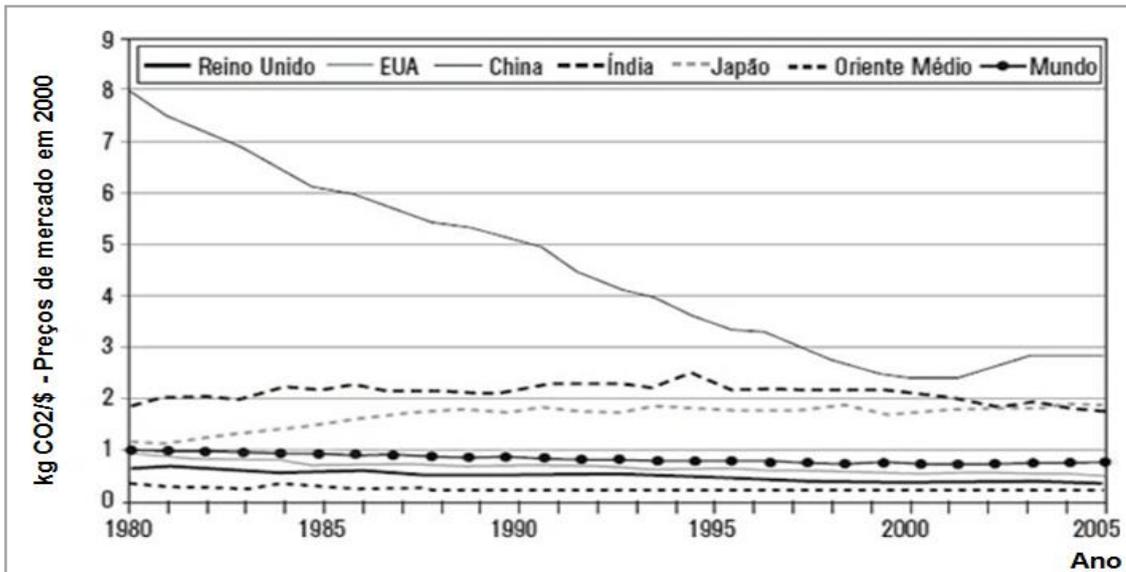
Legenda:

D.R - Descasamento Relativo  
 E - Emissão  
 \$ - Unidade Econômica

Fonte: o autor.

Nesse sentido, Ayres (2008) disserta que o consumo, inevitavelmente, traz o progresso tecnológico, os investimentos e o crescimento econômico. Por conseguinte, o crescimento econômico e a tecnologia alavancam o consumo. Trata-se de uma via de mão dupla em que, na maioria das vezes, não são computados os produtos consequentes dessa inter-relação. Na figura 25, demonstra-se os dados referentes ao descasamento relativo das emissões de CO<sub>2</sub> em vários países e no mundo como um todo. Percebe-se que a unidade de medida (kg CO<sub>2</sub>/\$) nos leva a uma interpretação de que as emissões de gás carbônico tem se reduzido drasticamente, principalmente na China.

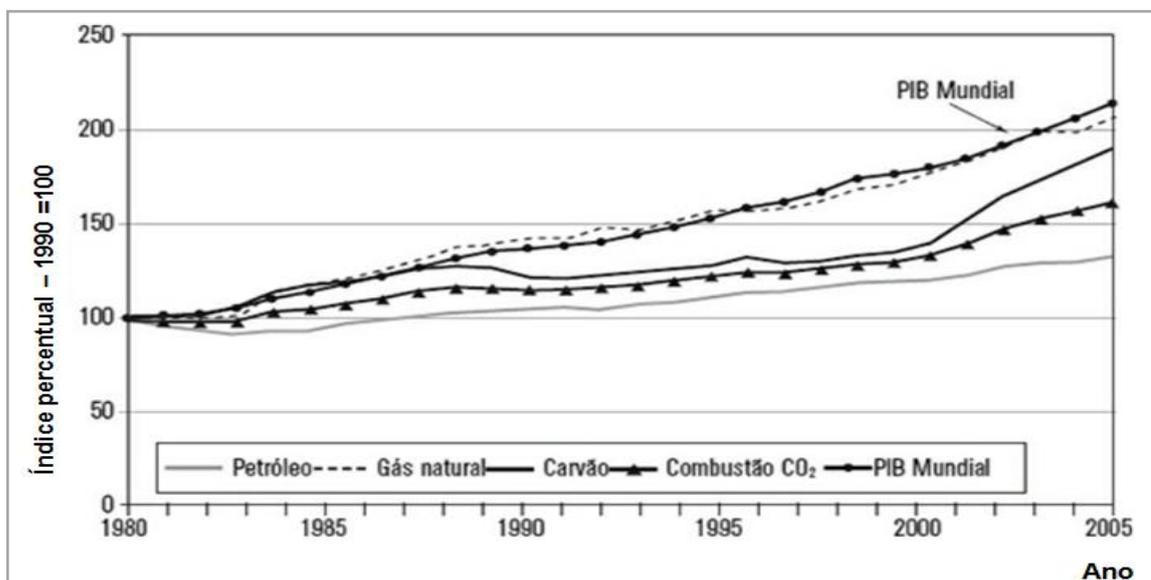
**Figura 25 – Emissões de CO<sub>2</sub> pelo PIB em Nações**



Fonte: Jackson (2013).

Todavia, ao se analisar os dados absolutos de consumo, emissões e crescimento econômico, demonstrados na figura 26, pode-se perceber que, apesar da eficiência energética ter diminuído a taxa de emissão e extração recursos por unidade econômica (descasamento relativo), isso não foi o suficiente para que houvesse uma diminuição real desses índices, em outras palavras o mundo produziu mais e, esse aumento na produção superou as melhorias e reduções causadas pela eficiência, resultando em um aumento real e absoluto do consumo do petróleo, gás e carvão, além das emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub>.

**Figura 26 – Tendências de Consumo de Combustíveis Fósseis e CO<sub>2</sub>**



Fonte: Jackson (2013).

Jackson (2013) questiona se, com o passar dos séculos, o modelo econômico atual levou a sério a questão da redução nas emissões de carbono. Analogamente, pode-se dizer que a preocupação com a escassez de recursos, a preservação da biodiversidade, além da erradicação da pobreza, também foram, em termos gerais, negligenciadas ao longo do tempo. O pesquisador argumenta que o “*business as usual*” prevê um cenário de crescimento da demanda de energia em 45% até 2030, além de um estarrecedor aumento de 80% nas emissões de carbono, sem nenhuma preocupação peremptória que, de fato, tornassem esses temas como prioridades em busca de soluções. Em outras palavras, trata-se de uma alegoria a suposição de que cortes incisivos nas emissões serão alcançados sem um confronto direto com a estrutura econômica.

Nesse sentido, Jackson (2013) sugere qual seria uma possível alternativa para a economia, no sentido de tirar carbono da atmosfera e criar novos valores de sociedade que, juntos, pudessem solucionar os problemas levantados. O economista expõe, em primeiro lugar, a necessidade de uma economia completamente diferente da que se tem no momento, dissertando que o modelo econômico regente “alimenta-se” de um aumento contínuo nas emissões, tendo como bases o crescimento da produção, e o consumo como impulsionador de sonhos. Assim, o autor propõe algumas medidas que poderiam atuar de maneira eficaz rumo à prosperidade e à harmonia da sociedade com o meio ambiente. Em princípio, uma simples análise do PIB per capita de vários países revela que, depois de um nível de renda anual (aproximadamente de US\$ 15.000,00), o nível de satisfação com a vida não mais responde aos aumentos do PIB daquele país. Em contrapartida, nos países que possuem um nível de renda anual muito baixo, um pequeno aumento da renda per capita é capaz de gerar grandes melhorias nos índices de satisfação com a vida. Em outros termos, esses dados indicam que há um forte argumento para que nações desenvolvidas sejam mais complacentes, dando apoio e oportunidades para os países mais pobres crescerem, pois é ali, exclusivamente, que o crescimento econômico ainda faz sentido e pode melhorar a vida das pessoas.

Ademais, de acordo com as alternativas propostas por Jackson (2013), o somatório da eficiência energética, da energia renovável e da redução na extração de materiais, seriam de vital importância para a sustentabilidade econômica. Além disso, seria necessário um esforço político contundente, uma promoção de mudanças radicais no padrão de consumo e aspirações da sociedade, além de um esforço internacional uníssono para, por fim, trazer as reduções necessárias e evitar um colapso nas bases ecológicas num futuro não muito distante. Finalmente, o autor deixa claro que a eficiência energética é uma grande ideia, e que o capitalismo, de fato, a coloca em prática. Contudo, o motor do crescimento econômico, à proporção que melhora a produtividade, também aumenta a escala de

produção. Exatamente nesse sentido, não há evidências científicas de que, um dia, a eficiência possa ultrapassar a escala de crescimento, de forma que ambos sejam compatíveis com a sustentabilidade.

Indubitavelmente, o que se demonstra aqui, não é um fator depreciativo da eficiência energética, mas sim uma crítica sobre a forma com que ela está vinculada ao sistema financeiro e social. Cedo ou tarde a questão ambiental deverá entrar nessa equação como um fator preponderante ao lucro, pois a sociedade baseada no crescimento econômico e no consumo sem precedentes está levando o mundo à escassez de recursos, às crises sociais e, por fim, às mudanças no clima. Adicionalmente a esse raciocínio, Shiva (2018) argumenta que, num contexto geral, existe uma insensatez que governa o mundo: a simples destruição gradual dos sistemas presentes na biosfera. Assim, o verdadeiro desafio da humanidade, atualmente, seria contra essa falta de bom senso, ou seja, contra a insensatez. Segundo Shiva (2018), o planeta Terra não irá acabar, pois este, desde a era pré-cambriana, já passou por períodos extremos, com diferentes índices atmosféricos, com altas e baixas temperaturas, até mesmo com ou sem a existência jurássica. Assim, o planeta também permanecerá com ou sem a presença dos seres humanos. Estes sim, seriam os seres dispensáveis nessa questão e, por isso, é extremamente necessária a proteção do ecossistema terrestre.

Finalmente, pode-se perceber, com notória clareza, que ações precisam ser tomadas de forma consuetudinária, tanto em nível individual, quanto societário, com o fito da busca de uma prosperidade partilhada globalmente. Por conseguinte, a sustentabilidade do ecossistema e a justiça social devem caminhar em consonância, promovendo uma condição mínima de dignidade a todos os habitantes do planeta, respeitando, concomitantemente, seus limites e recursos naturais.

Todos os conceitos detalhados nesse capítulo são de vital importância para o estudo posterior a ser demonstrado nos resultados deste trabalho. Na ocasião, será feita uma análise, com base nos valores obtidos pela ACV e FMEA, sobre a produção automobilística brasileira. O estudo visa demonstrar, considerando apenas a utilização do alumínio, quais seriam os benefícios da fonte de produção secundária, em termos do descasamento absoluto e relativo para o impacto mais crítico na produção de um carro. Trata-se de um estudo hipotético, mas que poderá ser utilizado como base para todos os outros materiais utilizados no carro, bem como outros setores da produção industrial.

## 4. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são abordados temas relacionados ao desenvolvimento e a metodologia utilizada neste trabalho. Em princípio, será preciso definir, de forma deliberada, uma faixa de variação da quantidade de alumínio presente nos carros da atualidade, esse dado se revela de extrema importância para a definição da unidade funcional a ser utilizada na ACV. Em segundo lugar, será elaborada uma análise do ciclo de vida para cada rota de produção do Al, com seus respectivos inventários. Por fim, aplicar-se-á a metodologia FMEA nos inventários da produção primária e secundária do alumínio, para efeitos de comparação e análise dos resultados.

### 4.1 Levantamento do Alumínio presente nos carros

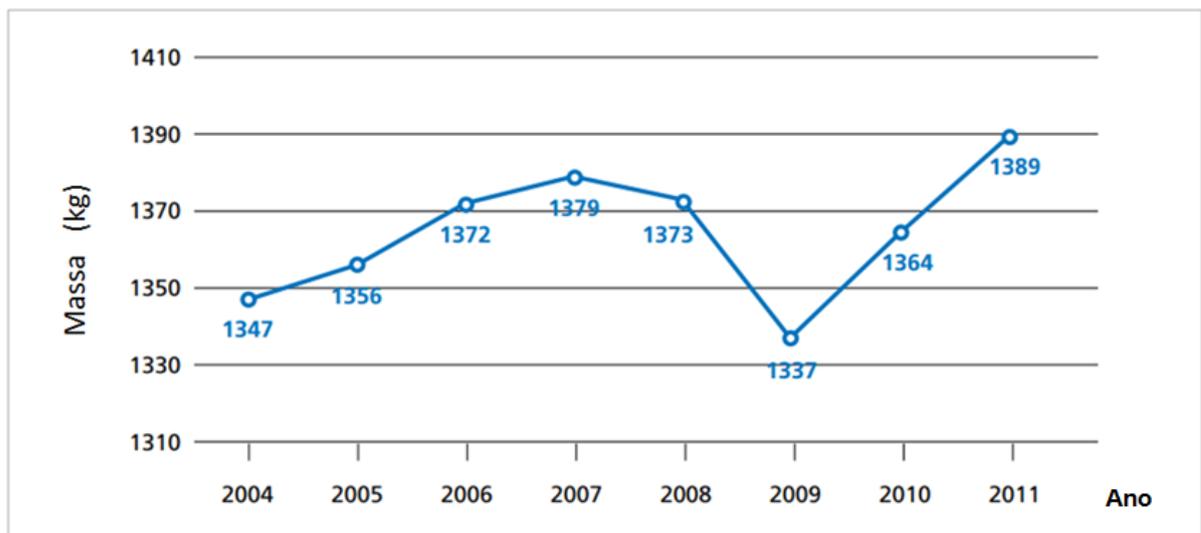
Conforme já explicado no capítulo 2, a quantidade de alumínio presente nos carros é fruto de enorme variação ao longo da história. Quando se trata da reciclagem automotiva, uma definição geral da massa de alumínio que um veículo possui, ainda é algo incerto e relativo. Outra questão relevante é a inexistência de uma indústria voltada, exclusivamente, a esse fim, sendo que poucos estudos sobre o tema foram feitos até então. Além disso, há uma dificuldade de se quantificar o alumínio presente nos carros devido à rápida mudança de tecnologia e componentes, à variação de tamanho dos veículos e aos diferentes modelos de carros das inúmeras montadoras.

Para ilustrar a situação, pode-se citar diferentes dados presentes na literatura, que já foram explicados no capítulo 2, e são resumidos no esquema a seguir:

- Passarini (2013): considera um valor presente de alumínio entre 30 a 80 gramas por quilo do carro, representando um total de 30 a 85 kg;
- Modaresi *et al.* (2012): fazem uma análise considerando as mudanças de massa do alumínio nos veículos desde os primórdios da produção em 1930. Já em 1978, considerava-se 32 kg e em 2009, 150 kg de alumínio em um veículo;
- Das *et al.* (2016): consideram uma faixa de 147kg, somando-se diferentes pesagens para componentes com alumínio forjado e fundido em um veículo;
- Kim *et al.* (2010): realizaram um estudo em que foi feita uma análise criteriosa de comparação das emissões de gases do efeito estufa para porcentagens de 6%,11% e 23% de alumínio nos carros.

Na figura 27, demonstra-se que nas últimas décadas houve um crescimento relativo quanto à média da massa total dos carros de passeio. Pode-se perceber que, em relação a 2004, houve uma diminuição de 10 kg. Contudo, a curva tende a crescer 42 kg em relação o valor inicial. Essa tendência, que contraria a busca por uma redução do peso final e, conseqüentemente, uma redução no consumo de combustível, justifica-se pela demanda cada vez maior de equipamentos e itens de conforto, por um apelo do consumidor em geral por carros maiores, além da exigência da legislação por novos itens de segurança. Ademais, outro fenômeno que permitiu esse aumento de massa foi a eficiência energética dos motores, que atualmente avançam em tecnologia, consumindo cada vez menos combustível (EAA, 2013). Aparentemente, a eficiência energética pode, em determinadas circunstâncias, trabalhar na contramão de algumas metas a serem atingidas, nesse caso a redução no peso final dos veículos. Por sua vez, essa diminuição de massa continua sendo um dos principais desafios na indústria automobilística.

**Figura 27 – Média de Massa dos Carros**

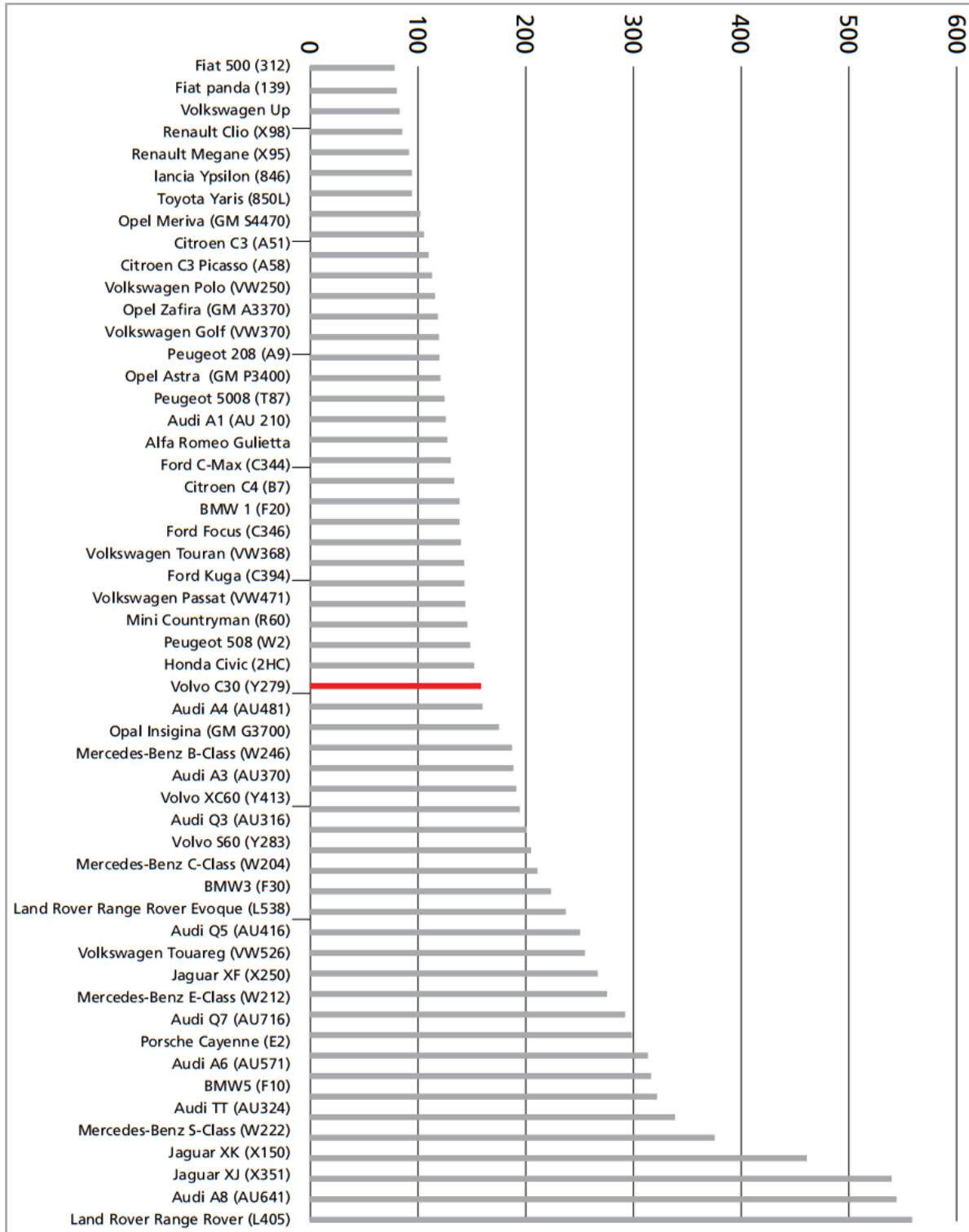


Fonte: EAA (2013).

A introdução de alumínio nos carros atua exatamente nesse problema. Pode-se dizer que existe uma tendência global de algumas montadoras na produção de veículos com alta intensidade de alumínio, conforme demonstrado na figura 28. Esse fato produz uma significativa redução de peso nos veículos em relação ao aço, metal largamente usado na composição dos carros. Todavia, ainda se trata de uma tendência inovadora, visto que a viabilidade econômica do aço ainda é maior que a do alumínio. Os *Aluminum Intensive Vehicles* (AIVs) podem promover uma redução total de 10% no peso do veículo e, por conseqüência, impactar em uma significativa redução de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Essa situação é ilustrada na figura 28. O modelo de carro AUDI A8, outrora demonstrado no capítulo 2, encontra-se em segundo lugar, em ordem decrescente da tabela.

**Figura 28 – Quantidade de Alumínio Presente nos Carros (kg)**



Fonte: EAA (2013).

Em suma, diante do exposto, será considerada uma faixa de variação que vai de 30 a 150 kg de alumínio por carro (mínimo e máximo). O estabelecimento dessa banda de valores é importante para futuras análises e comparações perante o cenário nacional automobilístico presente neste trabalho.

#### **4.2 Desenvolvimento da ACV – O Ciclo de Vida do Alumínio**

Esta seção destina-se ao desenvolvimento da ACV aplicada ao ciclo de vida do alumínio. Serão necessários conceitos vistos na revisão bibliográfica sobre o tema presente no capítulo 2. A elaboração de uma análise de ciclo de vida aborda, em primeiro lugar, as diferentes formas de produção de um material, nesse caso específico, a produção de alumínio primário via mineração e do alumínio secundário mediante a reciclagem. Ambos são aplicados em diversas utilizações na indústria automotiva e em uma miríade de componentes, peças e estruturas de um veículo.

Em segundo plano, serão apresentados fluxogramas de ambas as rotas de produção. Esses dados permitirão uma visão global do processo com suas respectivas entradas e saídas de matéria-prima, consumo energético e emissão de poluentes. Por fim, os dados são compilados em uma planilha de inventário, que desempenha uma função eminente na análise quantitativa do estudo.

Inúmeros trabalhos científicos já foram publicados relacionando diversas fases do processo de produção do alumínio com a metodologia ACV, entre eles pode-se destacar a pesquisa de Tan (2005) que publicou um estudo sobre a cadeia primária de produção do alumínio, composta por 4 cenários, sendo feitas melhorias na área de eficiência energética em cada um deles (redução da lama durante a refinaria, diminuição de resíduos nas fases de redução eletroquímica e fundição). O autor ratifica a conversão da bauxita em alumina e da alumina para o alumínio como processos de grande intensidade energética, além de externar preocupações inerentes às emissões atmosféricas e da produção de lama durante o processo.

Ademais, Bertram *et al.* (2009) elaboraram uma pesquisa sobre os gases do efeito estufa relacionados à produção de alumínio para o setor de transportes. Afirma-se que cerca de 19% dos gases de efeito estufa advindos da queima de combustíveis fósseis são gerados pelo setor. Além disso, é exposto que o alumínio reciclado pode ser utilizado em quase todas as aplicações, preservando, assim, a extração de matéria prima, a emissão de poluentes e promovendo grandes quantidades de economia de energia. Ainda, a lucratividade de um ELV teria um peso alto em relação à quantidade de alumínio que ele

contém, uma vez que o metal possui um elevado valor de sucata, que pode chegar a 10 vezes o valor da sucata de aço.

Outrossim, segundo Yellishetty (2009), a aplicação da metodologia ACV pode ser utilizada em diferentes setores de produção de diferentes metais, entre eles, obviamente, o alumínio. O autor utiliza-se da ISO 14040 para definir a ACV como uma técnica amplamente usada para mensurar os potenciais impactos ambientais de qualquer produto ou processo durante seu ciclo de vida, que vai desde a aquisição da matéria prima até o seu descarte. Além disso, um importante dado é citado em que, até o momento, nenhum estudo considerou os impactos do uso da terra na mineração como impacto a ser listado na ACV. A pesquisa valoriza a metodologia, demonstrando que, apesar estar em constante evolução e mudanças, a ACV já provou ser uma ferramenta valiosa na avaliação de impactos ambientais durante a produção de metais. É por essa razão que várias empresas já estão utilizando a metodologia como uma importante ferramenta para análise de performance ambiental.

Analogamente, Hong (2012) elaborou um ACV detalhado, com base num estudo de caso para produção de 1 tonelada de alumínio reciclado a ser utilizado pela indústria automotiva. Trata-se de uma pesquisa de excelência publicada no periódico *Journal of Cleaner Production*, em que as duas rotas de produção do alumínio são comparadas mediante uma elaboração completa de fluxogramas e inventários reais para a ACV. Toda a coleta de dados é derivada de duas usinas de produção de alumínio, localizadas nas províncias de Henan e Zhejiang na China.

Por conseguinte, Paraskevas (2015) realizou um estudo aplicado da ACV com interessantes resultados quantitativos e práticos na produção e análise de várias ligas de Al. O pesquisador afirma que, na prática, um ciclo aberto de reciclagem (*open-loop*) é mais comum que o ciclo fechado, contudo no ciclo aberto há várias perdas de material associadas. Ademais, expõe-se uma grande quantidade de designações e composições de ligas metálicas de alumínio, que já foram registradas na *Aluminium Association*. Os principais elementos que fazem ligas com o alumínio são o silício, o cobre, o zinco, o magnésio, e o manganês. Duas principais características podem ser definidas a respeito da concentração dos elementos da liga: alta pureza: até 10%, ligas fundidas: com até 20% de impurezas. Ainda, segundo Paraskevas (2015), na comparação de impactos ambientais causados pela reciclagem de diferentes ligas do alumínio, é importante desenvolver uma gestão estratégica sustentável para reconhecer as composições de materiais nos ciclos fechados. É demonstrado uma significativa melhora, atingindo uma redução de impactos pela adição de elementos para uma liga ou, simplesmente, pela separação e qualificação

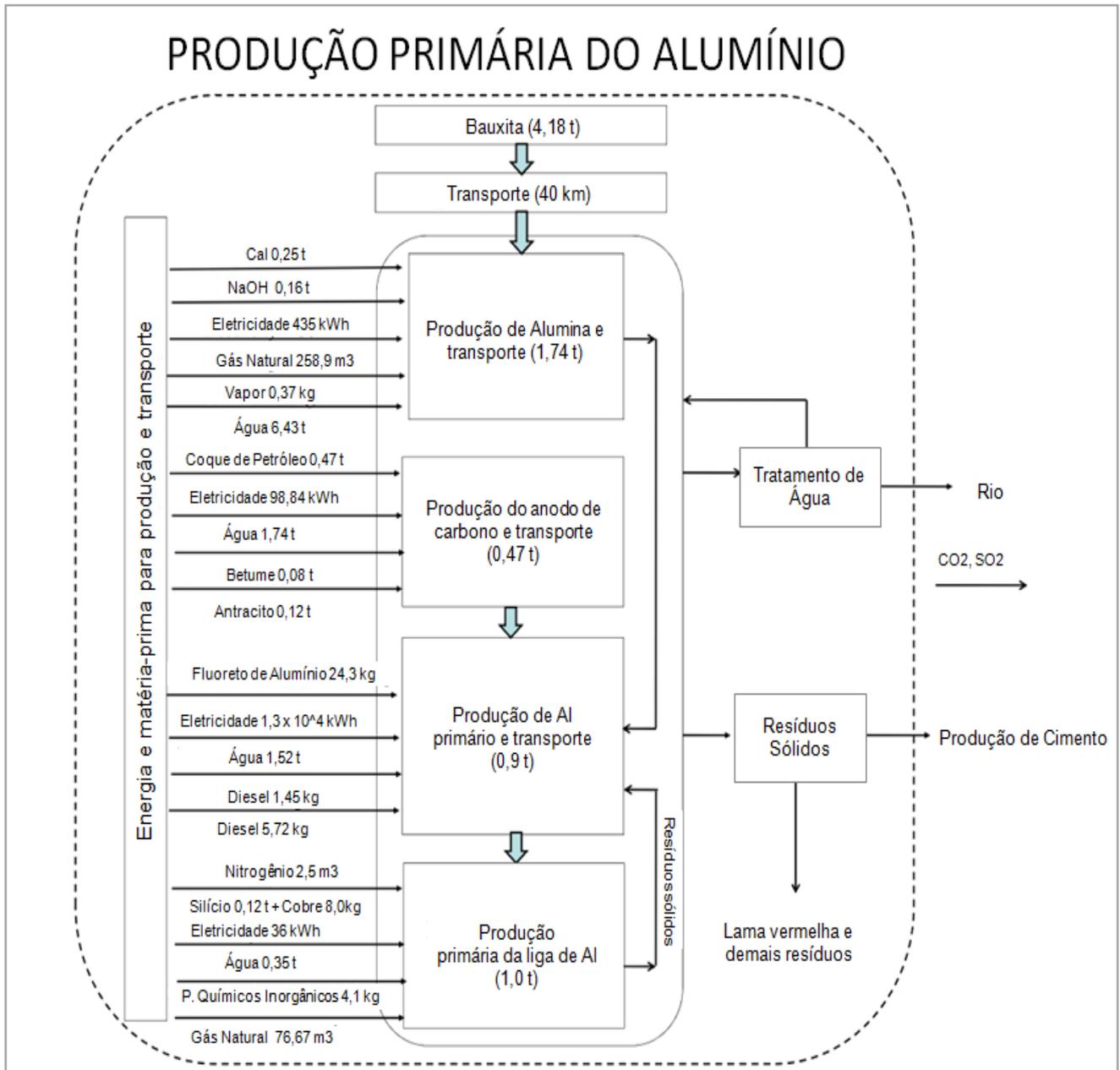
correta dos lotes de sucata que chegam do produtor. No intuito de superar as barreiras tecnológicas e financeiras no melhoramento da seleção de sucatas, uma estratégia no sistema de produção e na fonte de sucata deve ser adotada (reforço ao conceito de cadeia sistêmica de reciclagem). Há uma tendência de expansão de novos processos de *loop* fechado, focando na separação de acordo com a fonte do produto (latas de bebidas, esquadrias de janelas, motores, trocadores de calor, etc.). Essa tese, por exemplo, ratifica o objetivo deste trabalho, no que tange ao tratamento de ELVs. Desse modo, os motores devem ser selecionados e separados para serem utilizados como entrada na produção de novos motores, uma vez que representam a maior fração de alumínio nos automóveis. Nesse sentido, perdas de qualidade são minimizadas e maior eficiência é alcançada. Utilizar fluxos bem definidos de sucata em *looping* fechados pode ser a mais promissora solução em custo e preservação ambiental (PARASKEVAS, 2015), tratando-se de verdadeiras minas urbanas (reciclagem de produtos nas cidades).

### **4.3 Elaboração da ACV – Escopo e Fronteiras do Sistema**

Para fins deste trabalho, serão utilizados os resultados do trabalho de Hong (2012), uma vez que o artigo ilustra de forma clara e cabal um estudo de ACV para o alumínio. Na pesquisa é feita uma comparação entre o alumínio primário e o secundário, ambos utilizados como produto final na indústria automotiva. É importante ressaltar que os dados tratam de uma pesquisa e estudo de caso realizado na China. A grande diferença em relação a um possível cenário brasileiro seria a matriz energética para produção de eletricidade, que no Brasil é hidroelétrica e na China (para o estudo) foi considerada térmica, utilizando o carvão mineral como matéria-prima.

Para a produção primária do alumínio, o fluxograma ilustrado na figura 29, demonstra de forma sintética e visual todas as etapas do processo para a produção do metal. Inicia-se com a extração de 4,18 toneladas de bauxita, em uma mina localizada a uma distância de 40 km da refinaria. Esse dado é importante, visto que até o diesel computado no transporte do minério é considerado nos inventários. Pode-se perceber, logo na primeira etapa de produção, uma significativa quantidade de energia elétrica gasta para a produção da alumina, além de 160 kg de soda cáustica e 6,4 toneladas de água. Na fase de produção do alumínio em si, a eletricidade se torna o gargalo do processo, que requer 13.400 kWh de energia. Todas as etapas produzem algum tipo de resíduo, seja a lama, o gás carbônico e até mesmo o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Ao final, obtém-se a produção de uma tonelada de alumínio primário.

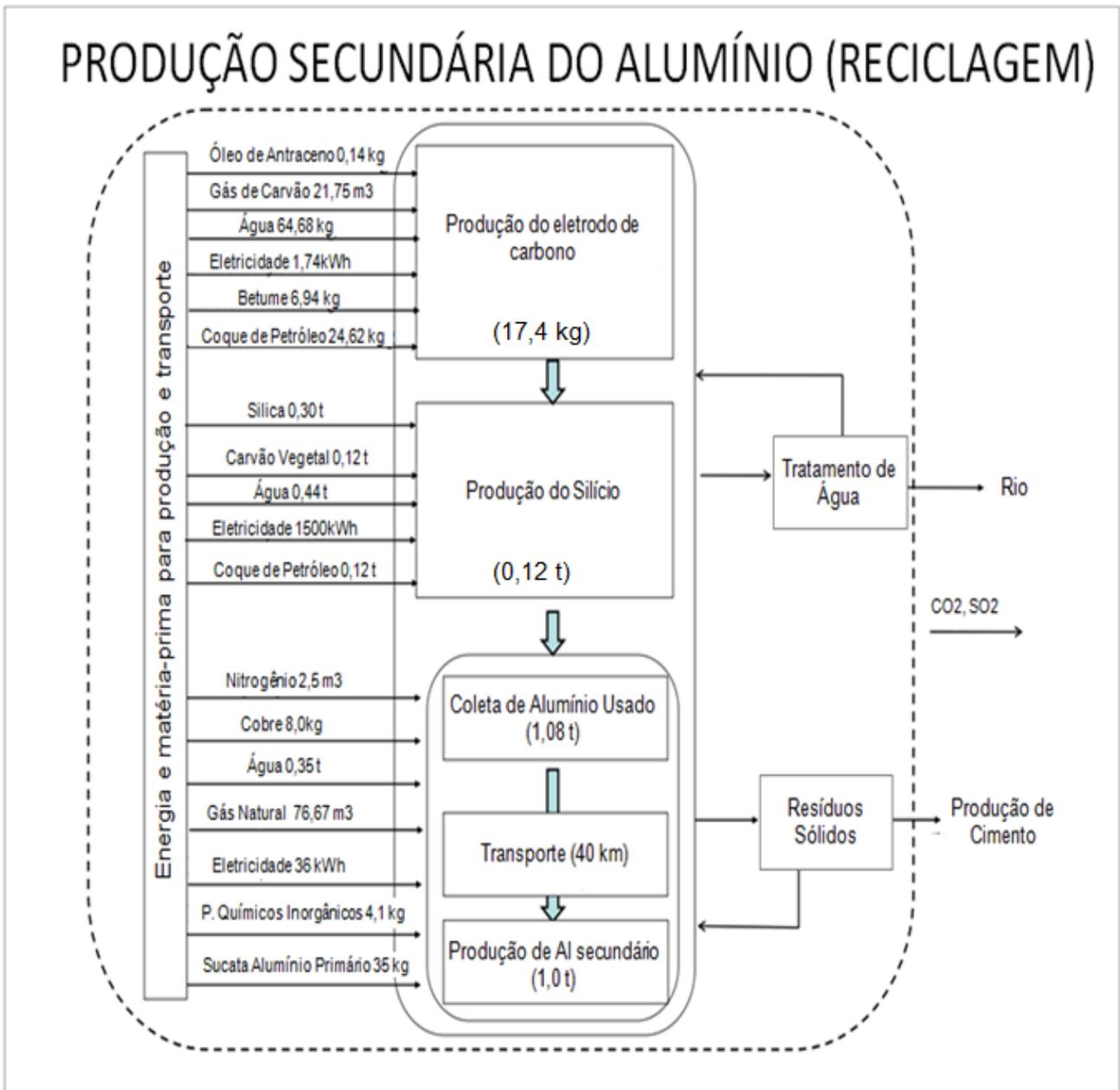
Figura 29 – Fluxograma Produção Primária



Fonte: Hong (2012), adaptado.

Já na produção do alumínio secundário, de acordo com uma análise da figura 30, é possível perceber que a etapa de mineração não consta no processo. Com a exceção da produção do silício e do eletrodo, o sistema inicia-se na coleta do alumínio descartado. A quantidade de energia elétrica gasta é significativamente menor, bem como o uso da água e do gás natural. Similarmente à produção primária, todas as etapas produzem algum tipo de resíduo, ou poluente, salvo a produção de lama, uma vez que na reciclagem não há o refinamento do metal. Contudo, ainda assim, os impactos ambientais gerados ao se reciclar um material devem ser devidamente registrados, para uma base sólida de comparação.

Figura 30 - Fluxograma Produção Secundária



Fonte: Hong (2012), adaptado.

#### 4.4 Elaboração do Inventário ACV

O inventário de uma ACV é um compilado de dados dispostos em uma planilha para que se possa ter uma visão geral e quantitativa dos sistemas de produção analisados. Para um melhor entendimento, foram dispostos em uma única fonte de dados as produções primárias e secundárias do alumínio. Assim, é possível perceber, mediante uma avaliação direta, quais as principais diferenças em cada processo.

**Tabela 1 - Inventário ACV: Al Primário e Secundário**

<b>Inventário do Ciclo de Vida - Valores para produção de 1 tonelada</b>			
	Al Primário	Al Secundário	Unidade
Alumínio Usado	x	1,08	t
Bauxita	4,18	0,16	t
NaOH (100%)	160	20	kg
Cal	0,25	0,01	t
Eletricidade	1,51x10 <sup>4</sup>	2,06x10 <sup>3</sup>	kWh
Gás Natural	335,57	87,73	m <sup>3</sup>
Vapor de Água	0,37	0,02	kg
Água	10,48	0,92	t
Coque de Petróleo	0,59	0,11	t
Betume	0,09	0,01	t
Antracito	0,12	4,77x10 <sup>-3</sup>	t
Fluoreto de Sal	24,3	0,94	kg
Diesel	1,45	0,06	kg
Carvão Mineral	5,72	0,22	kg
Cobre	8	8	kg
Silica	0,3	0,3	t
Nitrogênio	2,5	2,5	m <sup>3</sup>
Carvão Vegetal	0,12	0,12	t
Produtos Químicos Inorgânicos	4,1	4,1	kg
Gás de Carvão	21,75	21,75	m <sup>3</sup>
Óleo de Antraceno	x	0,14	kg
NH <sub>3</sub> -N	4,72	1,84	g
Poluentes do Petróleo	6,59	2,05	g
Phenol	0,38	0,01	g
Poeira	2,50	0,51	kg
SO <sub>2</sub>	5,40	0,21	kg
Tetrafluorometano	0,26	9,68x10 <sup>-3</sup>	kg
Etano Hexa-fluoreto	0,03	9,68x10 <sup>-4</sup>	kg
HF	0,52	0,02	kg
Lama Vermelha	1,13	x	t
Resíduos Gerais	13,22	x	kg
CO <sub>2</sub>	18400	2270	kg

Fonte: o autor, adaptado de Hong (2012).

É possível ressaltar, após análise dos dados, algumas peculiaridades inerentes a cada tipo de produção. Por exemplo, o alumínio primário não se utiliza em nenhum momento de qualquer quantidade de alumínio reciclado. Em contrapartida, para se produzir uma tonelada de alumínio secundário, são necessários 160 kg de bauxita, valor este, por sua vez, muito inferior as 4 toneladas exigidas pela mineração. O uso de eletricidade, água, gás natural,

lama vermelha e emissão de gás carbônico, em suma, possuem valores com altas discrepâncias entre os dois processos.

É importante atentar-se que, em uma interpretação desse inventário de ACV, é difícil quantificar a partir dos resultados quais impactos são mais significativos em cada processo. Percebe-se uma enorme variação de tipos de materiais envolvidos, com diferentes volumes, massas e unidades. Assim, por exemplo, seria impossível distinguir no sistema analisado, qual impacto ambiental pode ser mais crítico, visto que uma enorme quantidade de variáveis estariam envolvidas na questão, como por exemplo, fatores econômicos, detecção de poluentes, grau de disponibilidade de matéria-prima, o quão inexorável um impacto é ao meio ambiente, etc. Dessa forma, é muito difícil definir ações de priorização que permitam minimizar os impactos mais significativos em termos de sustentabilidade global dos processos somente a partir da análise convencional da ACV.

Diante do exposto foi desenvolvida uma metodologia de aplicação da ferramenta FMEA com a finalidade de auxílio na solução desse problema.

#### **4.5 Aplicação da FMEA ao Inventário ACV**

A combinação entre essas duas metodologias é algo relativamente novo na literatura científica. A aplicação dos conceitos da FMEA em um estudo de ACV foi apresentada pela primeira vez por Almeida Júnior e Castro (2014). Essa correlação das ferramentas foi denominada como Análise Estratégica do Ciclo de Vida, ou do inglês "*Strategic Life Cycle Assessment (SLCA)*". Nessa ocasião, a ACV foi utilizada em consonância com a FMEA para comparar tecnologias presentes em veículos elétricos e a combustão interna (ALMEIDA JÚNIOR E CASTRO, 2014).

Além disso, outros estudos foram desenvolvidos utilizando essa nova metodologia, a exemplo de Marques (2016), Reis (2015) e Quadra (2015), que aplicaram a ACV e a FMEA em conjunto para uma análise do ciclo de vida do aço, cobre e polímeros utilizados em veículos, respectivamente. Com a aplicação do método, esses autores foram capazes de determinar índices de prioridade de impactos ambientais, além de benefícios obtidos pela reciclagem dos respectivos materiais através da indústria venosa de veículos.

Para se atingir tal propósito, esse trabalho se valerá de dados do inventário ACV de Hong (2012), já descrito em seção anterior. O objetivo é demonstrar, de forma clara, quais seriam os pontos críticos relacionados à sustentabilidade ambiental das duas rotas de produção do alumínio. Para a aplicação desse estudo de FMEA, algumas adaptações nos conceitos da metodologia precisam ser feitas. Sob essa perspectiva, as falhas não mais devem ser tratadas como defeitos mecânicos ou do processo. Estas são definidas como

impactos causados por cada matéria-prima envolvida no ciclo de vida do produto, no caso o alumínio. Desse modo, são analisados os impactos relativos ao consumo e extração de materiais, além dos impactos ambientais gerados no processo de produção em si, tais como, emissões de poluentes, resíduos, etc.

#### 4.5.1 Definição do Índice de Severidade - (IS)

Conforme já foi visto, a produção de alumínio requer uma série de recursos naturais e, por consequência, gera uma série de impactos ambientais. Portanto, em relação aos recursos consumidos no processo, estes podem ser classificados com renováveis ou não renováveis. Considerando os produtos finais da produção de Al, que não o próprio metal, alguns deles podem contribuir para o efeito estufa e outros não. Ainda alguns subprodutos podem causar chuvas ácidas, enquanto outros não causam nenhum impacto no meio ambiente. De modo análogo, quanto maior for a massa de um produto envolvido em um processo, maior será seu impacto, uma vez que este já esteja classificado.

Por essa razão, o (IS) para esse estudo deve ser composto por dois fatores: o fator peso por categoria, do inglês *Weight Factor by Category (WFC)*, além da massa e energia relativa associada a tal impacto. Assim uma classificação de impactos mediante sua categoria, recebe uma indexação de WFC, sendo o valor 5 como um impacto de baixa severidade e um WFC igual a 10 para impactos mais severos. Os detalhes da classificação são mostrados na tabela 2.

**Tabela 2 – Classificação do Índice de Severidade de Impactos**

Categoria	Baixo Impacto WFC = 5 (menos severo)	Grande Impacto WFC = 10 (mais severo)
<b>A</b> – Consumo de Material	Fonte Renovável	Fonte Não - Renovável
<b>B</b> – Consumo de Energia	Fonte Renovável	Fonte Não - Renovável
<b>C</b> – Emissões Atmosféricas	Não Contribui para o Efeito Estufa	Contribui para o Efeito Estufa
<b>D</b> – Resíduos Líquidos	Há Tratamento	Não Há Tratamento
<b>E</b> – Resíduos Sólidos	Reciclável	Não Reciclável

Fonte: Reis (2015).

O valor da massa relativa (%m) e da energia relativa (%E), definidos por Almeida Júnior e Castro (2014), são calculados de acordo com as equações (6) e (7). Estas grandezas representam a quantidade relativa em porcentagem de um determinado impacto em relação a soma de todos os impactos considerados no inventário. Dessa forma, um alto valor dessas grandezas representa uma contribuição efetiva no processo global.

$$\%m = \frac{\text{massa do impacto}}{\Sigma \text{ massa de todos os impactos}} \quad (6)$$

$$\%E = \frac{\text{energia do impacto}}{\Sigma \text{ energia de todos os impactos}} \quad (7)$$

Ao fim, o índice (IS) é calculado pela eq.(8) e deve ser aproximado para cima, em caso do resultado ser um número decimal:

$$(IS) = 1 + (\% m) \cdot WFC \quad (8)$$

#### 4.5.2 Definição do Índice de Ocorrência - (IO)

Os valores do índice de ocorrência (IO), dependem da frequência que uma falha ocorre, ou nesse caso específico, da frequência que um impacto é observado na ACV. É possível perceber que ao se produzir o alumínio, os impactos, sejam eles de qualquer natureza, ocorrem simultaneamente e continuamente durante toda a rota de produção. Por essa razão o índice de ocorrência deve ser considerado o mais crítico, ou seja, igual a 10. Isso aplica-se, por definição a todos os materiais e recursos presentes no inventário. O único impacto que recebe uma qualificação de menor valor é o consumo de energia, uma vez que este está atrelado ao tipo do sistema gerador de energia. No caso desse estudo, esse item recebe a taxação de (IO) no valor de 8, uma vez que o ciclo de vida de uma usina térmica a carvão é de aproximadamente 30 anos, de acordo com trabalho publicado por Almeida Júnior e Castro (2014).

#### 4.5.3 Definição do Índice de Detecção - (ID)

O índice de detecção está relacionado a probabilidade de se detectar um impacto do inventário da ACV para o alumínio. Na tabela 3, ilustra-se como deve ser feita essa classificação.

**Tabela 3 – Escala para o Índice de Detecção**

Nível de Detecção	Exemplos de Impactos	(ID)
Detecção garantida	Consumo de Energia	1
		2
Boas Chances de Detecção	Perda de Energia (calor, ar, etc.)	3
		4
Detecção Possível	Resíduos Sólidos	5
		6
Difícil de se Detectar	Resíduos Líquidos	7
		8
Muito Difícil a Detecção	Emissões Atmosféricas	9
Impacto Impossível de Ser Detectado		10

Fonte: Almeida Júnior e Castro (2014).

Uma vez definidos todos os índices, o RPN é calculado de acordo com a equação (9):

$$\text{RPN} = (\text{IS}) \cdot (\text{IO}) \cdot (\text{ID}) \quad (9)$$

#### 4.6 FMEA Aplicada às Rotas de Produção do Al

O cálculo de todos os índices FMEA, bem como seus respectivos RPNs, são demonstrados nas tabelas 4 e 5, para a produção primária e secundária do alumínio, nessa ordem.

Tabela 4 – FMEA Alumínio Primário

FMEA & Inventário do ACV – Al Primário								
Material / Energia / Emissões	Unidade	Al Primário	Categoria Impacto	WFC	(IS)	(IO)	(ID)	RPN
Bauxita	kg	4180	A	10	2	10	1	22
NaOH (100%)	kg	160	A	10	1	10	1	10
Gás Natural	kg	257	A	10	1	10	4	43
Vapor de Água	kg	0,37	A	5	1	10	4	40
Água	kg	10480	A	5	2	10	1	25
Coque de Petróleo	kg	590	A	10	1	10	1	12
Betume	kg	90	A	10	1	10	1	10
Fluoreto de Sal	kg	24,3	A	10	1	10	1	10
Diesel	kg	1,45	A	10	1	10	1	10
Carvão Mineral	kg	5,72	A	10	1	10	1	10
Cobre	kg	8	A	10	1	10	1	10
Silica	kg	300	A	10	1	10	1	11
Nitrogênio	kg	2,91	A	5	1	10	4	40
Carvão Vegetal	kg	120	A	10	1	10	4	41
Produtos Químicos Inorgânicos	kg	4,1	A	10	1	10	4	40
Gás de Carvão	kg	9,3	A	10	1	10	4	40
NH <sub>3</sub> -N	kg	0,00472	C	5	1	10	9	90
Poluentes do Petróleo	kg	0,00659	C	5	1	10	9	90
Poeira	kg	2,5	E	10	1	10	6	60
SO <sub>2</sub>	kg	5,4	C	5	1	10	9	90
Tetrafluorometano	kg	0,26	C	10	1	10	9	90
HF	kg	0,52	C	5	1	10	9	90
Lama Vermelha	kg	1130	D	10	1	10	5	66
Resíduos Gerais	kg	13,22	E	10	1	10	5	50
CO <sub>2</sub>	kg	18400	C	10	6	10	9	553
Consumo Eletricidade	kWh	1,51x10 <sup>4</sup>	B	10	10	8	2	160

Fonte: o autor.

Tabela 5 – FMEA AI Secundário

FMEA & Inventário do ACV – AI Secundário								
Material / Energia / Emissões	Unidade	AI Secundário	Categoria Impacto	WFC	(IS)	(IO)	(ID)	RPN
Alumínio Usado	kg	1080	A	5	2	10	1	21
Bauxita	kg	160	A	5	1	10	1	12
NaOH (100%)	kg	20	A	10	1	10	1	10
Gás Natural	kg	67,2	A	10	1	10	4	45
Vapor de Água	kg	0,02	A	5	1	10	4	40
Água	kg	920	A	5	2	10	1	19
Coque de Petróleo	kg	110	A	10	1	10	1	12
Betume	kg	10	A	10	1	10	1	10
Fluoreto de Sal	kg	0,94	A	10	1	10	1	10
Diesel	kg	0,06	A	10	1	10	1	10
Carvão Mineral	kg	0,22	A	10	1	10	1	10
Cobre	kg	8	A	10	1	10	1	10
Silica	kg	300	A	10	2	10	1	16
Nitrogênio	kg	2,91	A	5	1	10	4	40
Carvão Vegetal	kg	120	A	10	1	10	4	49
Produtos Químicos Inorgânicos	kg	4,1	A	10	1	10	4	40
Gás de Carvão	kg	9,3	A	10	1	10	4	41
NH <sub>3</sub> -N	kg	0,00184	C	5	1	10	9	90
Poluentes do Petróleo	kg	0,00205	C	5	1	10	9	90
Poeira	kg	0,51	E	10	1	10	6	60
SO <sub>2</sub>	kg	0,21	C	5	1	10	9	90
Tetrafluorometano	kg	0,00968	C	10	1	10	9	90
HF	kg	0,02	C	5	1	10	9	90
Lama Vermelha	kg	0	D	10	1	0	5	0
Resíduos Gerais	kg	0	E	10	1	0	5	0
CO <sub>2</sub>	kg	2270	C	10	5	10	9	492
Consumo Eletricidade	kWh	2,06x10 <sup>3</sup>	B	10	10	8	2	160

Fonte: o autor.

Em uma breve análise das tabelas 4 e 5, é possível perceber que os modos de falha, ou nesse caso específico, os impactos mais críticos do processo (com maiores RPNs) são as emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) seguidas da eletricidade, para ambas as rotas de produção. É importante enfatizar que, para os inventários analisados neste estudo, esses dois impactos estão intimamente correlacionados, visto que uma quantidade significativa do  $\text{CO}_2$  emitido durante a produção do alumínio é causada pela geração de eletricidade. Esse dado ratifica a pesquisa de Paraskevas (2015), em que o alumínio é um dos materiais mais intensivos, em termos de energia, do mundo. Sua produção demanda alto consumo de eletricidade em kWh, essa energia é necessária para desconectar os três átomos de oxigênio ligados aos átomos de alumínio na alumina (processo de Hall-Héroult). Isto é confirmado ao se analisar as tabelas, que mostram a prioridade dos impactos citados, como os de maiores valores de RPN.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do trabalho. Em suma, pode-se dizer que os valores obtidos estão em consonância com os objetivos previamente discutidos na seção 1.2 do capítulo 1.

### 5.1 Análise dos Impactos mais Críticos com base nos Resultados FMEA

A seção 4.4 demonstra uma possível lacuna na interpretação do inventário da ACV, uma vez que torna-se difícil quantificar, a partir dos resultados, quais impactos são mais significativos em cada processo. Diante disso, é possível perceber uma enorme variação dos tipos de materiais envolvidos, com diferentes volumes, massas e unidades, ficando muito complexa a distinção de qual impacto ambiental seria o mais crítico naquele processo. Uma consequência dessa situação é a dificuldade na definição de ações que permitam minimizar os impactos mais significativos, em termos de sustentabilidade global, apenas com o uso convencional da ACV. Por esse motivo foi desenvolvida a metodologia de aplicação da FMEA e os resultados são expostos a seguir.

- Índice Global - Produção Primária (sem reciclagem):

$$\Sigma \text{RPN} = 1713$$

- Índice Global - Produção Secundária (utilizando ELVs):

$$\Sigma \text{RPN} = 1558$$

Em primeiro lugar, percebe-se uma redução expressiva no somatório dos RPNs na produção secundária. Esse dado revela tratar-se de um processo com menores índices de prioridades específicos, ou seja, a reciclagem como um todo, possui uma avaliação crítica de impactos individuais menores que a rota de produção primária. Em outros termos, utiliza-se menos materiais, menos processos e, por consequência, mais eficiência para produzir uma tonelada de alumínio.

- Emissão de CO<sub>2</sub> - Produção Primária (sem reciclagem):

18.400 kg de CO<sub>2</sub> para produção de 1 tonelada de alumínio

- Emissão de CO<sub>2</sub> - Produção Secundária (utilizando ELVs):

2.270 kg de CO<sub>2</sub> para produção de 1 tonelada de alumínio

Em segundo plano, ao se analisar o CO<sub>2</sub>, item com o índice mais crítico de ambos os processos (aquele com o maior índice RPN), percebe-se uma redução significativa nas

emissões via reciclagem de ELVs. Ao todo, cerca de 88% menos dióxido de carbono é emitido na atmosfera. Uma análise individual das massas desse gás, em princípio, poderia levar a uma expectativa de redução também relevante no índice RPN da produção secundária. Contudo, os valores de 553 e 492, referentes ao índice de risco global (produção primária e secundária, respectivamente), não inferem essa significativa diferença. Isso se deve ao fato de o CO<sub>2</sub> ser um gás contribuinte do efeito estufa, de difícil detecção e alta frequência em ambos os processos analisados, atribuindo-lhe elevados índices de severidade, detecção e ocorrência na análise FMEA. Por esses motivos, os RPNs analisados possuem pesos semelhantes, não sendo a diferença entre a quantidade de gás nos dois processos o fator preponderante para diferenciação dos RPNs, mas sim, seus impactos ambientais avaliados como um todo em cada rota de produção individualizada.

- Consumo de Eletricidade - Produção Primária (sem reciclagem):

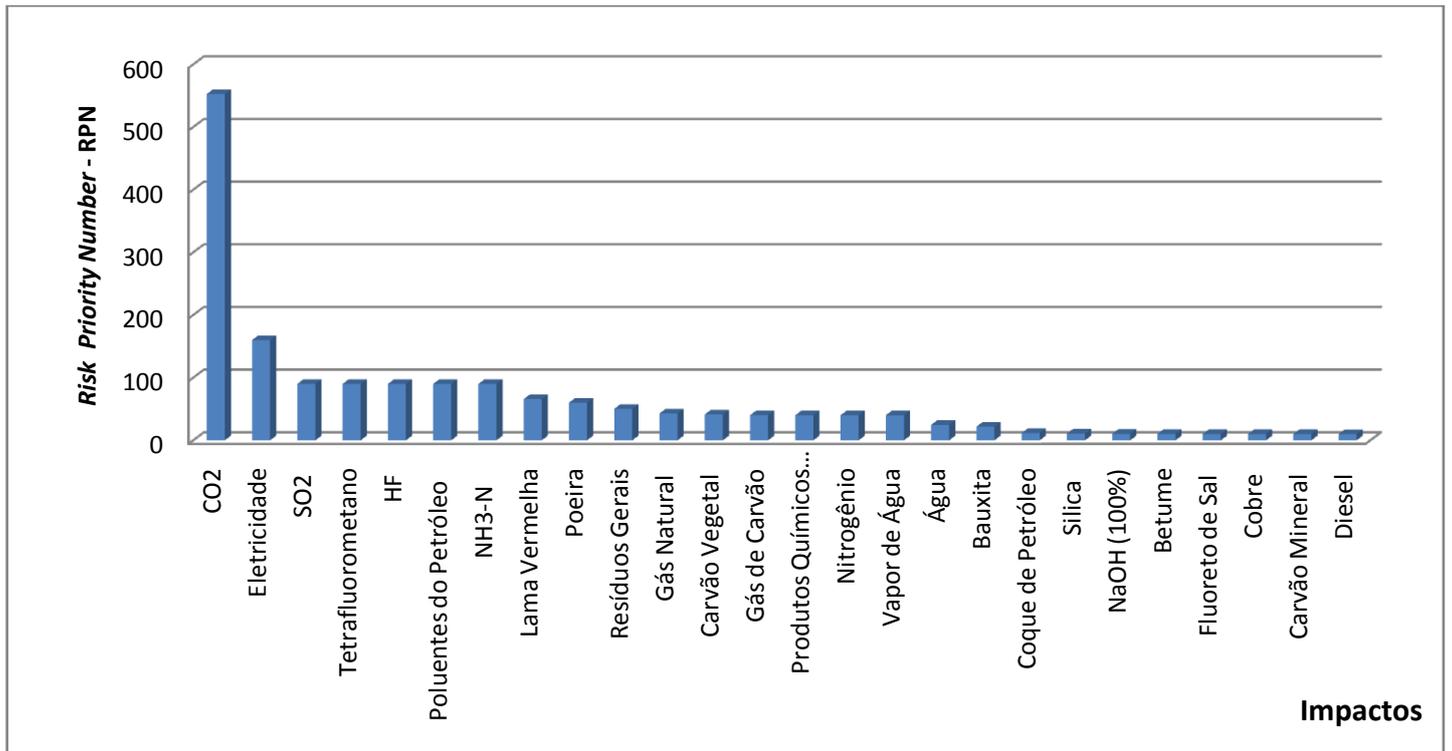
15.100 kWh para produção de 1 tonelada de alumínio

- Consumo de Eletricidade - Produção Secundária (utilizando ELVs):

2.016 kWh para produção de 1 tonelada de alumínio

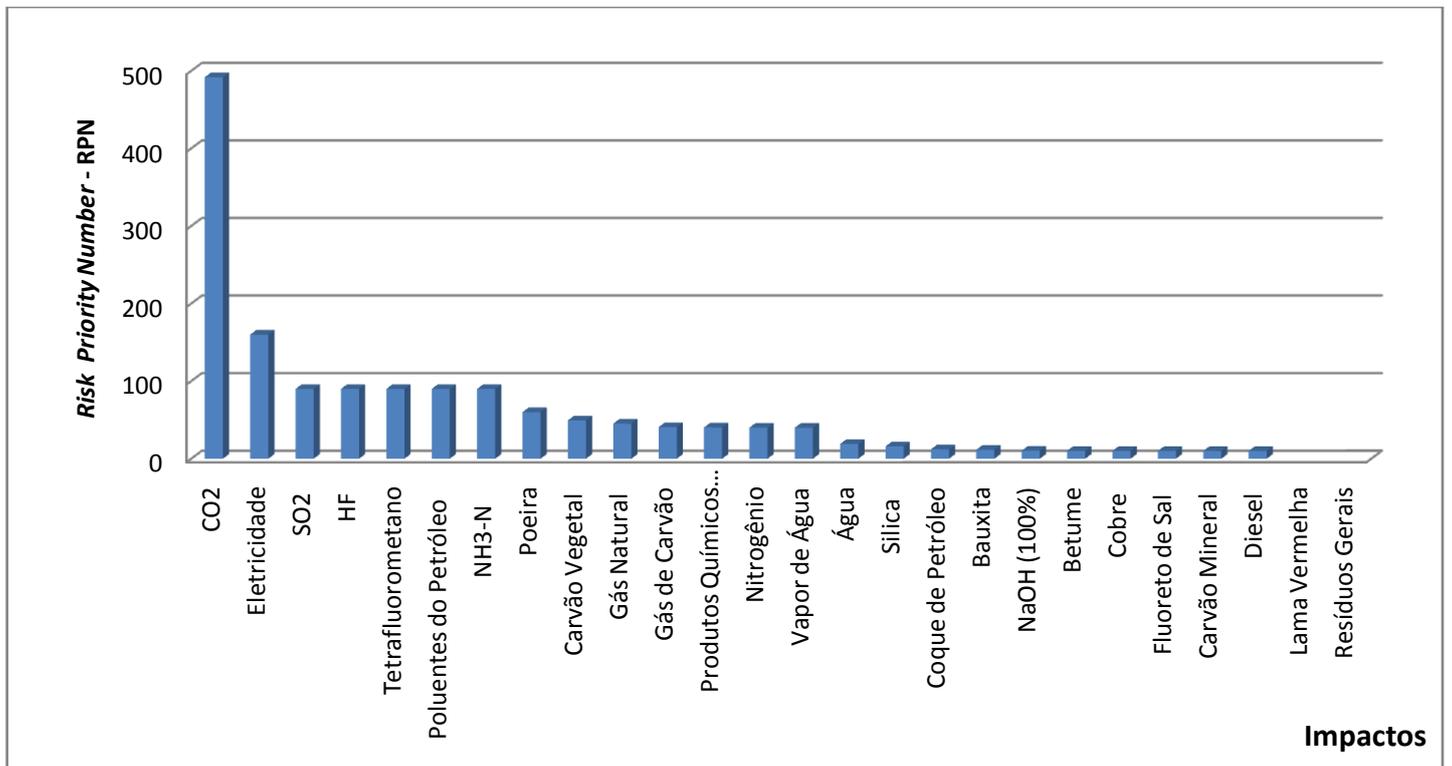
Por fim, o segundo impacto mais crítico para ambas as rotas de produção foi o consumo de energia elétrica. A reciclagem do alumínio seria capaz de promover uma economia de aproximadamente 87% em kWh. O valor idêntico dos RPNs (160) nos leva à inferência que o fato da utilização de uma fonte não renovável para prover a energia é um fator de peso, tanto para a produção primária, quanto para a secundária. Conforme já visto em revisão bibliográfica, o alumínio é um dos materiais mais intensivos do mundo em termos energéticos. Esse dado traz certa previsibilidade quanto à classificação crítica desse impacto na análise global da FMEA. Ainda, outros cinco impactos receberam um RPN de valor igual a 90 e merecem ser destacados, são eles: a amônia (NH<sub>3</sub>), por se tratar de um gás tóxico e corrosivo, os poluentes derivados do petróleo em geral, o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), responsável pelas chuvas ácidas, o tetrafluorometano (CF<sub>4</sub>), gás também contribuinte para o efeito estufa, e, por último, o ácido fluorídrico (HF), que em solução aquosa corrói vidros. Outro ponto importante são os rejeitos da mineração que receberam uma taxa de RPN igual 66 para a produção primária. Já a produção secundária não produz a lama vermelha, recebendo um índice RPN igual a zero para esse impacto. Esse dado agrega ainda mais valor ao processo de reciclagem, visto os lamentáveis acidentes ambientais ocorridos no país, conforme discutido na seção 2.2.1. Uma visão geral de todos os impactos e seus respectivos índices globais são ilustradas nas figuras 31 e 32.

Figura 31 – FMEA - Impactos mais Críticos - Produção 1ª



Fonte: o autor.

Figura 32 - FMEA - Impactos mais Críticos - Produção 2ª

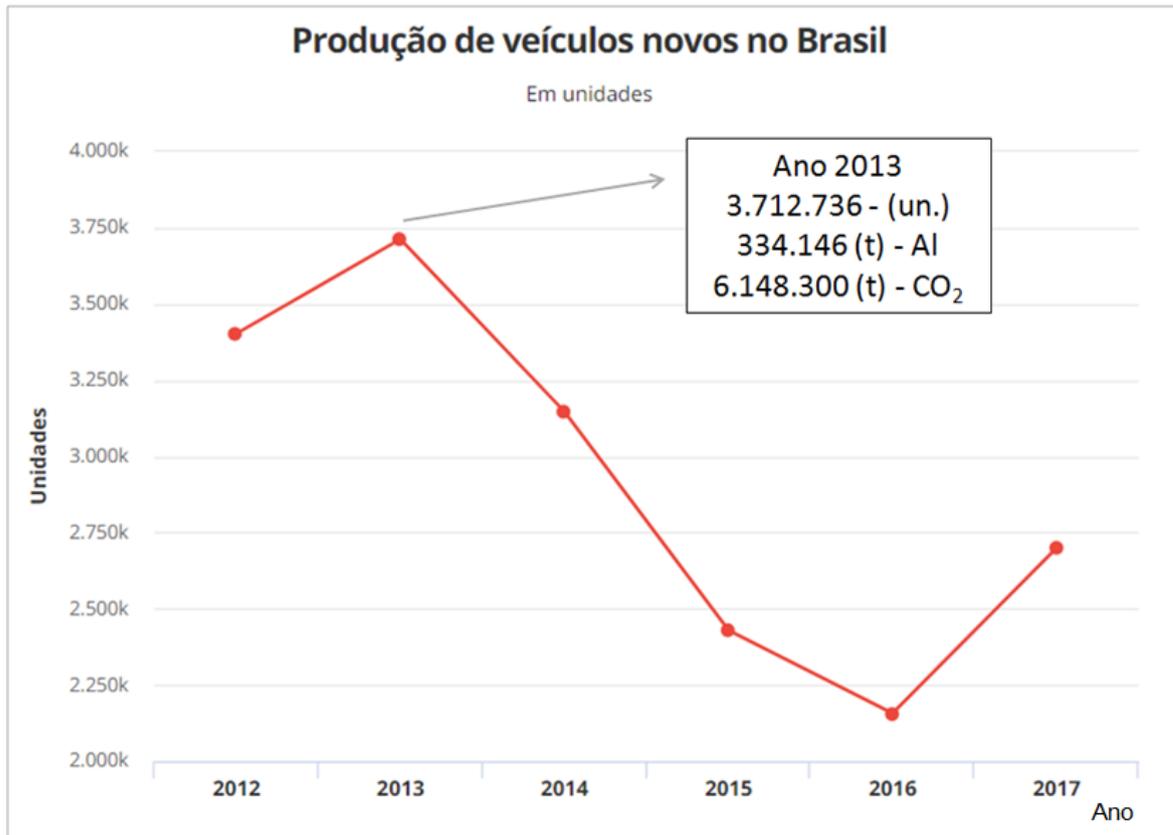


Fonte: o autor.

## 5.2 Resultados FMEA x Redução Absoluta de CO<sub>2</sub> na Indústria Automotiva

Mediante os resultados obtidos pela ACV e FMEA, é possível fazer um estudo aplicado ao cenário de produção automotiva no Brasil. De acordo com dados da ANFAVEA, publicados pelo site G1 – Auto Esporte (2018), o ápice da produção de veículos no país ocorreu em 2013, com um total de 3,712 milhões de unidades fabricadas (figura 33).

**Figura 33 – Produção da Indústria Automotiva Nacional**



Fonte: ANFAVEA (2017); G1 – Auto Esporte (2018).

Conforme detalhado na seção 5.1, a análise da FMEA revela que a emissão de CO<sub>2</sub> é o impacto mais crítico na produção do alumínio. Por conseguinte, considerando os dados da figura 33, é possível calcular o quanto a indústria automotiva emitiu de gás carbônico (especificamente quanto ao uso do alumínio) em seu pico de produção, considerando que toda a fonte de matéria-prima foi a produção primária desse metal. O cálculo é demonstrado a seguir pela equação (10), em que se considera uma massa média de 90 kg de alumínio por carro, conforme definido na seção 4.1.

$$\begin{aligned}
 Al_{\text{Total}} &= 3.712.736 \text{ (un.)} \cdot 90 \text{ (kg Al / un.)} \\
 Al_{\text{Total}} &= 334.146 \text{ (t Al)} \\
 CO_2_{\text{Total}} &= 334.146 \text{ (t Al)} \cdot 18,4 \text{ (t CO}_2\text{ / t Al)} \\
 CO_2_{\text{Total}} &= 6.148.300 \text{ (t CO}_2\text{)}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Partindo desse cenário, todo alumínio utilizado pela indústria automotiva nacional foi responsável pela emissão de aproximadamente 6.150.000 toneladas de CO<sub>2</sub>, o que representaria 0,0006 % da meta de 1 trilhão de toneladas a serem emitidos até 2050, citada no capítulo 3, como limite para alterações climáticas. Este percentual pode vir a parecer um valor irrisório a primeira vista, contudo deve-se perceber que essa é a taxa de emissão anual, para apenas um metal utilizado no carro, em somente um setor da indústria brasileira. Não se pode desconsiderar que a meta de um trilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> foi estabelecida como objetivo global, para todos os setores de produção, em todos os países do mundo. A partir desse ponto, percebe-se a dimensão e a gravidade do problema. Portanto, compete uma análise semelhante sobre a utilização da fonte de produção secundária do alumínio, ou seja, utilizando a cadeia sistêmica de reciclagem automotiva, já discutida na seção 2.3.

Nesse sentido, o valor calculado da quantidade de alumínio utilizado pela indústria se mantém constante, correspondendo ao total de 334.146 toneladas. Entretanto, uma análise dessa situação, sob a perspectiva da reciclagem pode fornecer dados diferentes. Na planilha FMEA relativa a produção secundária do metal (tabela 5), tem-se o valor de 2,27 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de alumínio produzido. Aplicando esse valor de maneira análoga à equação (10), outrora demonstrada, chega-se aos seguintes resultados descritos pela equação (11):

$$\begin{aligned}
 Al_{Total} &= 3.712.736 \text{ (un.)} \cdot 90 \text{ (kg Al / un.)} \\
 Al_{Total} &= 334.146 \text{ (t Al)} \\
 CO_{2\ Total} &= 334.146 \text{ (t Al)} \cdot 2,27 \text{ (t CO}_2 \text{ / t Al)} \\
 CO_{2\ Total} &= 758.512 \text{ (t CO}_2\text{)}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

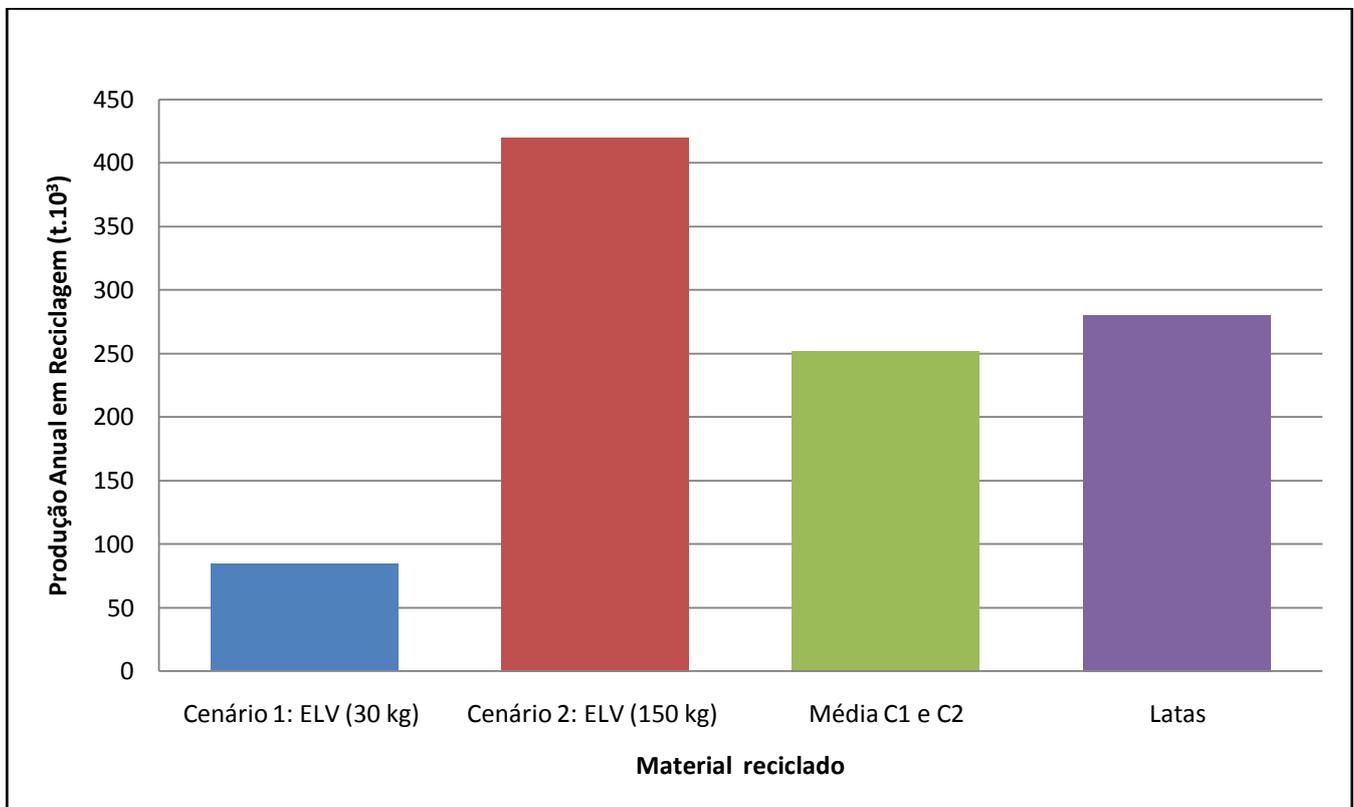
O valor de 758.512 toneladas de CO<sub>2</sub> representa uma redução de aproximadamente 88% em relação à produção primária, valor este que está de acordo com os gráficos da seção 5.1. É importante ressaltar que até mesmo essa expressiva redução de impacto estaria atrelada ao crescimento econômico da indústria automotiva. Os resultados relativos à eficiência energética, nesse caso, estão produzindo um descasamento absoluto nos níveis de emissão do CO<sub>2</sub>. Contudo, um aumento na produção anual de carros, levaria conseqüentemente a um aumento nos níveis de emissões, que podem, em um certo momento, superar a eficiência energética causada pela reciclagem. Ambas as situações, demonstradas nas equações (10) e (11) comprovam, de maneira quantitativa, toda a teoria entre o crescimento macroeconômico e os limites sustentáveis do planeta, descritas no capítulo 3 - Macroeconomia e Sustentabilidade - deste trabalho.

### 5.3 Reciclagem Automotiva x Reciclagem de Latas de Bebida

Visando demonstrar o potencial econômico que a indústria venosa dos ELVs possui, é feita uma comparação com o mercado de reciclagem das latas de bebida no Brasil. Conforme já visto no capítulo 2, o país é líder mundial no setor, reciclando uma faixa de 98% do total produzido, ou seja, praticamente toda sua produção de latas de alumínio. Apenas no ano de 2016, foram recicladas 280 mil toneladas de sucata de latas de alumínio, o que injetou cerca de R\$ 950 milhões de reais na economia nacional.

Na seção 4.1 foi visto que ao se tratar da reciclagem automotiva, o volume de alumínio a ser reciclado é ainda incerto, uma vez que ainda não se tem uma indústria voltada a esse fim e poucos estudos sobre o tema aplicado ao mercado brasileiro foram feitos. Além disso, há a dificuldade de se quantificar o alumínio presente nos carros, devido a rápida mudança de tecnologia e componentes, a variação de tamanho dos veículos, somada aos diferentes modelos de carros das inúmeras montadoras. Para fins deste trabalho, foram considerados dois cenários com uma quantidade de 30 e 150 kg por carro (mínima e máxima). Será considerada a reciclagem de uma quantidade equivalente a 4,4% (valor de referência do Japão) da frota brasileira e os resultados são expressos na figura 34.

**Figura 34 – Potencial da Reciclagem Veicular**



Fonte: o autor.

Dados (valores aproximados):

– Total da Frota:	64 000 000 un.
– Total de veículos reciclados por ano:	2 800 000 (4,4%) un.
– Cenário 1: 30 kg de Al por Carro:	84 000 t
– Cenário 2: 150 kg de Al por Carro:	420 000 t
– Média entre os dois cenários:	252 000 t
– Reciclagem anual de latas:	280 000 t

Conforme demonstrado na análise comparativa do gráfico apresentado na figura 34, ao ser considerado o potencial de recuperação do alumínio proveniente de um processo sistêmico de reciclagem de veículos no Brasil, pode-se obter valores expressivos, bem próximos da quantidade total de alumínio reciclado hoje via latas de bebidas. Isso reforça o potencial que a reciclagem de ELVs possui não apenas para os produtores e consumidores de alumínio no Brasil, mas também para diversos outros produtos e materiais encontrados nos veículos em fim de vida útil. Além disso, os resultados demonstram a importância da reciclagem automotiva no ciclo de vida do alumínio, tanto na eficiência energética quanto na redução de impactos ambientais.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou de forma quantitativa a importância do processo de reciclagem para a sociedade. Conclui-se que é preciso parar de tratar a matéria-prima como lixo. A exemplo desse conceito, conforme foi explicitado, um ELV é uma verdadeira fonte de recursos e não apenas sucata. O próprio nome ferro-velho já atribui aos depósitos de carros um conceito pejorativo, sendo mais adequada a denotação de “minas automotivas”, uma vez que ali, literalmente, podem ser “lavrados” inúmeros materiais a serem reutilizados ou reciclados.

Dessa forma, este estudo, inserido em um contexto atual da sociedade, teve como objetivo principal estabelecer uma comparação das duas rotas de produção do alumínio utilizado nos carros. A primeira, utilizando-se da mineração da bauxita e a segunda, utilizando-se do alumínio proveniente dos veículos reciclados. Portanto, por intermédio da metodologia utilizada, foi possível atingir os objetivos gerais enumerados na seção 1.2 deste trabalho e recapitulados a seguir:

1. Conclui-se a importância do papel histórico e atual do alumínio presente nos veículos, uma vez que os dados apresentados demonstraram que existe uma tendência de crescimento no uso desse metal, que pode chegar a mais de 500 kg por carro, no caso dos AIVs. Atualmente, esse valor ainda é incerto, podendo variar de 30 a 150 kg para um veículo de passeio.
2. O levantamento dos inventários de materiais e recursos para a produção de uma tonelada de alumínio foi de fundamental importância para as análises apresentadas neste trabalho. Por meio desses inventários, foi possível demonstrar as principais diferenças em cada processo de produção (primário e secundário) e concluir quais foram os benefícios da reciclagem: - menor consumo energético, menor quantidade de material e recursos naturais utilizados e, principalmente, menos emissões atmosféricas. Contudo, ainda se mostrava necessária uma análise criteriosa sobre qual impacto seria o mais crítico em cada rota de produção.
3. Por meio da metodologia FMEA x ACV adotada, os resultados foram obtidos e permitiram concluir que a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foi o impacto ambiental mais crítico para ambas as rotas de produção do metal. Ainda, o benefício da rota secundária mais uma vez foi ratificado, demonstrando uma redução de 88% nas emissões desse gás, que possui fundamental importância na estabilidade climática do planeta Terra.

Além disso, foram acrescentados outros dois objetivos específicos no intuito complementar a teoria abordada neste trabalho e suas conclusões são apresentadas a seguir:

4. De forma estimada, foi quantificada a massa total do alumínio presente em todos os carros que poderiam ser reciclados no Brasil. Após sua comparação com o processo de reciclagem para latas de bebidas, conclui-se o enorme potencial que o alumínio presente nos veículos pode representar à indústria nacional, podendo chegar a valores que se aproximam, dependendo das circunstâncias, aos do mercado de latas de bebida, setor este em que o Brasil é primeiro colocado na escala mundial.
5. Os resultados obtidos pela análise FMEA foram correlacionados diretamente com a redução absoluta das emissões de CO<sub>2</sub>, impacto mais crítico revelado pelo método. O estudo, feito sob a perspectiva do número de veículos produzidos pela indústria automotiva brasileira, apresentou conceitos macroeconômicos e suas relações com a eficiência energética, concluindo que a reciclagem, ponderando o crescimento econômico, pode levar a um descasamento absoluto na emissão de CO<sub>2</sub>.

Conclui-se, portanto, que os objetivos deste trabalho foram atingidos. Foi demonstrado o importante papel do alumínio na indústria automotiva, além do estudo de suas rotas de produção, desde a extração ou reciclagem até seu descarte final, que ratificou as principais diferenças em cada processo. Outrossim, a revisão bibliográfica das ferramentas ACV e FMEA foram de suma importância para aquisição de conceitos e aplicabilidade ao tema. Definiu-se os inventários de materiais e recursos necessários à produção de uma tonelada de alumínio a ser utilizado para fabricação de veículos, em ambas as rotas de produção, explorando, por meio da FMEA, quais foram os impactos mais críticos em cada processo. Os resultados foram contundentes, confirmam a importância da reciclagem automotiva no ciclo de vida do alumínio, tanto na eficiência energética quanto na redução de impactos ambientais. Fica a questão se o mercado brasileiro está preparado para o que pode vir a ser a segunda maior fonte de alumínio reciclado no país.

Ao se tratar da relação entre o crescimento macroeconômico e a eficiência energética, os resultados obtidos pela FMEA foram correlacionados diretamente com a redução absoluta da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Este gás, invisível e não tóxico, é o principal responsável pelo agravamento do efeito estufa e deve ser tratado por sua relevância inexorável ao planeta, respeitando-se os limites de emissões pré-estabelecidos em acordos internacionais.

Por fim, pode-se concluir, por meio dos resultados apresentados, uma análise ambiental detalhada, visando tanto à redução de impactos quanto a sustentabilidade operacional de cada rota de produção do alumínio, inferindo-se suas respectivas consequências para a indústria automobilística e para a sociedade como um todo. A questão climática, bem como a limitação ecológica do planeta, são assuntos de eminente importância, e devem ser tratados com seriedade pragmática não só pelos governos, mas também, setores industriais e acadêmicos. Por conseguinte, conclui-se que a eficiência no uso de recursos, a utilização de energias renováveis, bem como a redução na extração de matérias-primas via reciclagem são assuntos de extrema importância no contexto econômico global e ambiental. Nessa conjuntura, este trabalho reforça o papel da reciclagem do alumínio nos carros e sua possível contribuição para o desenvolvimento sustentável do Brasil e do mundo.

### **6.1 Trabalhos Futuros**

O processo de reciclagem veicular surgiu como uma alternativa para reaproveitamento de importantes materiais contidos nos ELVs. Além disso, o método propicia uma importante redução de impactos ambientais relacionados as emissões atmosféricas e extração de matéria-prima. Este trabalho fecha um ciclo de pesquisas realizado por Reis (2015), Quadra (2015) e Marques (2016), que pesquisaram os papéis do cobre, polímeros e aço na reciclagem de veículos. O alumínio, importante material na composição dos carros, contribui para esse histórico de pesquisas sobre o tema. Nesse raciocínio, cabe aos próximos pesquisadores realizarem um compilado dos resultados dos trabalhos anteriores, demonstrando assim, de forma uníssona, quais os principais impactos na produção de um veículo como um todo, além dos benefícios que a reciclagem dos materiais podem proporcionar.

Ademais, pode-se incluir nesse grupo de pesquisas, a reciclagem do vidro, outro importante componente do carro que, absolutamente, precisa ser tratado como material a ser reciclado. De acordo com a revista Pensamento Verde (2014), cerca de 1,5 milhões de vidros para-brisa são trocados por ano no Brasil, fato este que torna o assunto relevante, pois a iniciativa seria mais uma alternativa na resolução de problemas quanto à disposição de resíduos sólidos. No caso do vidro para-brisa, após o beneficiamento, seu uso é muito eficaz no processo produtivo, uma vez que as perdas durante o processo de reciclagem são mínimas.

Pode-se dizer que essas propostas para futuros trabalhos estão em consonância com a contemporaneidade dos valores sustentáveis, pois a busca pelo reaproveitamento de materiais ou a reciclagem de recursos em que, obviamente os ELVs estão contidos, contribuem de forma deliberada para a perenidade do planeta Terra.

## REFERÊNCIAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Reciclagem de Latinhas no Brasil. Disponível em: <<http://abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/latinhas-campeas/>>, 2016.

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Características Químicas e Físicas. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>, 2018a.

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Cadeia Primária. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>, 2018b.

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Processos de Produção. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/processos-de-producao/>>, 2018c.

ALLEN, M., *et al.* Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458, p. 1163 – 1166, 2009.

ALMEIDA JÚNIOR, H. A. and CASTRO, D.E. New Methodology for the Analysis of Global Impact of New Technologies. SAE Technical Paper 2014-36-0191, 2014, doi: <https://doi.org/10.4271/2014-36-0191>, 2014.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Produção anual de carros no Brasil. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2017.html>>, 2017.

AYRES, R. Sustainability economics: where do we stand. *Ecological Economics* v. 67, p. 281 – 310, 2008.

AUDI – Bem-vindo ao futuro - O novo Audi A8. Disponível em: <<http://www.audi.pt/pt/web/pt/modelos/a8/NovoAudiA8.html>>, 2018.

BELBOOM, S., LEWIS, G., BAREEL, P. F. AND LÉONARD, A., Lifecycle assessment of hybrid vehicles recycling: Comparison of three business lines of dismantling. *Waste Management*, v. 50, p. 184 - 193, 2016.

BERTRAM, Marlen *et al.* Analysis of greenhouse gas emissions related to aluminium transport applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment* v. 14, p.62 – 69, 2009.

BRASKEM – Avaliação do Ciclo de Vida. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/analise-de-ciclo-de-vida>>, 2018.

CASTRO, D.E. Reciclagem e Sustentabilidade na Indústria Automobilística. Disponível em: <<http://www.savemotors.com.br/site/downloads/Reciclagem-e-Sustentabilidade-na-Industria-Automobilistica.pdf>>, 2012;

CEFET- MG - Centro Federal de Educação Tecnológica – Projeto de Reciclagem de Veículos é lançado. Disponível em: <<http://www.cefetmg.br/noticias/arquivos/2015/04/noticia024.html>>, 2015.

CICEK, Kadir and CELIK, Metin Application of failure modes and effects analysis to main engine crankcase explosion failure on-board ship. *Safety science*, v. 51 p. 6 - 10, 2013.

CURRAN, Mary A. A Brief History of Life-Cycle Assessment. National Risk Management Research Laboratory US., 2006.

DAS, Sujit *et al.* Vehicle light weighting energy use impacts in U.S. light-duty vehicle fleet. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 8, p. 5 – 13, 2016.

EAA - European Aluminium Association. Aluminium in Cars. Disponível em: <<https://www.european-aluminium.eu/resource-hub/?id=1870>>, 2013.

EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL, Directive 2000/53/EC of the European parliament and of the council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles, *Off. J. Eur. Union* L269, 34–42, 2000.

EUROSTAT – Statistics Explained End-of-life Vehicle Statistics. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=End-of-life\\_vehicle\\_statistics&oldid=387117](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=End-of-life_vehicle_statistics&oldid=387117)>, 2019.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J.L.D., Reliability and Industrial Maintenance. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=\\_GhSnuKRBtwC&hl=pt-BR](https://books.google.com.br/books?id=_GhSnuKRBtwC&hl=pt-BR)>, Elsevier 2009.

FORTES, R. G. Identificação e avaliação dos principais aspectos relacionados à reciclagem dos plásticos mais utilizados no setor automobilístico brasileiro e o seu atendimento à regulamentação ambiental. Dissertação - Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2008.

G1 - Globo Minas. CEFET-MG desenvolve projeto de reciclagem automotiva em BH, 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minasgerais/noticia/2015/04/cefet-mg-desenvolve-projeto-de-reciclagem-automotiva-em-bh.html>>, 2015.

G1 – Auto Esporte. Produção de veículos sobe 25,2% no Brasil em 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/carros/noticia/producao-de-veiculos-sobe-252-no-brasil-em-2017-diz-anfavea.ghtml>>, 2018.

GADJIL, M., e GUHA, R. Ecology and Equity – The Use and Abuse of Nature in Contemporary India. Nova York: Routledge, 1995.

GUINEE, Jeroen B. *et al.* Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. Environmental Science & Technology, v. 45, p. 90 – 96, 2011.

GOLEMAN, Daniel. Foco: A atenção e seu papel fundamental para o sucesso. Tradução Cássia Zanon. 1. Ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 2015.

HIRATSUKA, J. *et al.* Current status and future perspectives in end-of-life vehicle recycling in Japan. Journal of Material Cycles and Waste Management, v.16, p.21-30, 2014.

HOLANDA, Fernando. Macroeconomia – Escola de Pós-Graduação em Economia FGV. Disponível em: <<https://epge.fgv.br/we/MFEE/Macroeconomia/2010?action=AttachFile&do=get&target=MacroHolanda.pdf>>, 2010.

HONG, Jingmin; ZHOU, Jing; HONG, Jinglan. Environmental and economic life cycle assessment of aluminum-silicon alloys production: a case study in China. Journal of Cleaner Production, v.24, p.11-19, 2012.

HOSEYNABADI, A. H.; Oraee, H. and Tavner, P. J. Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 32, p. 817 - 824, 2010.

HYDRO. Mineração de bauxita. Disponível em: <<https://hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Mineracao-de-bauxita/>>, 2018.

HYDRO. Produção Primária. Disponível em: < <https://hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Da-alumina-ao-aluminio/>>, 2018a.

IAI - International Aluminium Institute. Primary Aluminium Smelting Power Consumption. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-power-consumption>>, 2018a.

IAI - International Aluminium Institute. Home. Disponível em: <<http://bauxite.world-aluminium.org/home/>>, 2018b.

IAI - International Aluminium Institute. Refining Process. Disponível em: <<http://bauxite.world-aluminium.org/refining/process/>>, 2018c.

IAI - International Aluminium Institute. Reduction. Disponível em: <<http://primary.world-aluminium.org/index.php?id=286&L=0>>, 2018d.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Frota de veículos. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/painel/frota.php>>, 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of the Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

IREC - International Recycling Education Center. Our activities. Disponível em: <<http://www.rum-alliance.com/en/activities/>>, 2018.

ISO - International Organization For Standardization – 14040. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, 1997.

ITAÚ – Macro Visão. Disponível em: <<https://www.itaubba-pt/analises-economicas/publicacoes/macro-visao/declinio-secular-das-commodities-de-volta-a-tendencia>>, 2015.

JACKSON, Tim. Prosperidade Sem Crescimento: Vida Boa em um Planeta Finito; Tradução: José Eduardo Mendonça. São Paulo: Planeta Sustentável; Ed. Abril, 2013.

JAMA - Japan Automobile Manufacturers Association – The Motor Industry of Japan 2018. Disponível em: <<http://www.jama-english.jp/publications/MIJ2018.pdf>> , 2018.

JONG, Chian Haur; TAY, Kai Meng *et al.* Application of the fuzzy failure mode and effect analysis methodology to edible bird nest processing. Computers and Electronics in Agriculture. v.96, p. 90 - 108, 2013.

JORNAL ESTADO DE MINAS – Foto do pátio do DETRAN-MG, 2016. Disponível em: <[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/03/28/interna\\_gerais,747932/cobranca-acima-de-30-diarias-para-carros-apreendidos-pelo-detran-e-su.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/03/28/interna_gerais,747932/cobranca-acima-de-30-diarias-para-carros-apreendidos-pelo-detran-e-su.shtml)>, 2016.

KIM, Hyung-Ju *et al.* Greenhouse Gas Emissions Payback for Light Weighted Vehicles Using Aluminum and High-Strength Steel. Journal of Industrial Ecology. v.14, p. 929 - 946, 2010.

LEI FEDERAL DO DESMONTE. Lei 12.977/14. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2014/Lei/L12977.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Lei/L12977.htm)>, 2014.

LEI SOBRE DESTINAÇÃO DE VEÍCULOS EM FIM DE VIDA (SP). Lei 15.276/14. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2014/lei-15276-02.01.2014.html>>, 2014.

LIU, Gang.; MÜLLER, Daniel B. Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. Journal of Cleaner Production, v.35, p.108 – 117, 2012.

LIU, Hu-Chen; LIU, Long and LIU, Nan. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. Expert systems with applications. v.40, p. 828 - 838, 2013.

MACHINE DESIGN. Looking back in time: 50 years ago in machine design, July 1955. Machine Design, p.136, 7 July 2005.

MINISTRY OF THE ENVIRONMENT GOVERNMENT OF JAPAN. Enactment of ministerial ordinances for partially amending the enforcement regulations of the law for the recycling of end-of-life vehicles. Disponível em: <<https://www.env.go.jp/en/press /2003/0808b.html>>, 2003.

MALAGUETA, Diego C.; MEDINA, Heloísa V. O Desafio da Reciclagem de Plásticos Automotivos - Anais das XI Jornadas de Iniciação Científica. Rio de Janeiro: CETEM, 2003.

MARQUES, J. G., Análise Crítica da Reciclagem de Aço no Ciclo de Vida dos Automóveis, Dissertação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

MARQUES, J.G; CASTRO, D.E. Venous Industry: a new Japanese concept of vehicle recycling to recover materials, components and to maximize the economic value of End of Life Vehicles in Brazil. 25° Congresso SAE Brasil, São Paulo, SP, Brasil, 2016.

MODARESI, Roja; MÜLLER, Daniel. The Role of Automobiles for the Future of Aluminum Recycling. *Environmental Science & Technology*, v.46, p. 8587 – 8594, 2012.

NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration. Requirements and Procedures for Consumers Assistance to Recycle and Save Program. USA: Department of Transportation. Disponível em: <<https://www.oig.dot.gov/ library-item/29980>>, 2009.

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, p. 266 - 274, 2010.

OICA - International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. 2017 Production statistics. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/ production-statistics/2017-statistics/>>, 2017.

ONU – Organização das Nações Unidas. World population prospects: the 2006 revision, highlights. UN Department of Economic and Social Affairs. Nova York: United Nations. Disponível em: < [http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/ WPP2006\\_Highlights\\_rev.pdf](http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/ WPP2006_Highlights_rev.pdf). > , 2007.

PARASKEVAS, Dimos *et al.* Environmental impact analysis of primary aluminium production at country level. *Procedia CIRP*, v.40, p. 209 – 213, 2016.

PARASKEVAS, Dimos *et al.* Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 105, p. 357 – 370, 2015.

PASSARINI, Fabrizio *et al.* Aluminium flows in vehicles: enhancing the recovery at end-of-life. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v.16, p.39 – 45, 2013.

PASSOS, A. Manoel. *Macrovisão - Declínio secular das commodities, de volta à tendência. Análises Econômicas, Publicações, Pesquisa macroeconômica Itaú*, 2015.

PEDROSA, Giovani J. *Modelação Física da Disposição de Rejeitos de Bauxita por Meio de Diques-Testes. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Núcleo de Geotecnia, UFOP*, 2012.

PENSAMENTO VERDE - Iniciativa para a reciclagem de para-brisas automotivos. Disponível em: <<https://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/companhia-de-embalagens-cria-iniciativa-para-reciclagem-de-para-brisas-automotivos/>>, 2014.

PERUZZO, Francisco; CANTO, Eduardo. *Química na Abordagem do Cotidiano - 4 Ed.* São Paulo: Moderna; Ed. Abril, 2012.

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>, 2010.

QUADRA, R. G. F. *Análise Comparativa das Tecnologias de Tratamento de Resíduos Poliméricos Aplicadas ao Polipropileno Proveniente da Reciclagem de Veículos. Dissertação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais*, 2015.

REIS, E. P. *Análise do Ciclo de Vida do Cobre no Processo de Reciclagem de Veículos. Dissertação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais*, 2015.

REBITZER, Gerald *et al.* Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international*, v. 30, p. 701-720, 2004.

RUM ALLIANCE. Re-Use Motorization Alliance. Introducing the RUM Alliance. Disponível em: <<http://www.rum-alliance.com/en/profile/video.php>>, 2018.

STERN, N. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

SHIVA, Vandana. There always has been a way to stop the world from ending. HI - Journal, v. 17. Disponível em: <<http://hi-journal.com/index.php/2018/03/02/there-always-has-been-a-way-to-stop-the-world-from-ending/>>, 2018.

SINDIPEÇAS. Relatório da Frota Circulante 2018. Disponível em: <[https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2018/R\\_Frota\\_Circulante\\_2018.pdf](https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2018/R_Frota_Circulante_2018.pdf)>, 2018.

SILVA, Alex; Komatsu, Roberta. Conceito dos 3R: um breve referencial para uma empresa sustentável. Revista Inter Atividade, edição especial, 2014.

TAN, R.B.H; KHOO, H.H. An LCA study of a primary aluminum supply chain. Journal of Cleaner Production, v. 13, p. 607 – 618, 2005.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. The history of aluminum in cars. Disponível em: <<http://www.aluminum.org/product-markets/automotive>>, 2018.

THE HENRY FORD ORGANIZATION. 1909 Ford Model T Touring Car. Disponível em: <<https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/>>, 2018.

US GEOLOGICAL SURVEY - United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2006.

USBERCO, João; SALVADOR, Edgard. Química – Volume Único. 7 ed. Reformada. São Paulo: Saraiva, 2006.

ZHAO, Q. and CHEN, M. A comparison of ELV recycling system in China and Japan and China's strategies. Resources, Conservation and Recycling v.57, p.15-21, 2011.

YELLISHETTY, Mohan *et al.* Life cycle assessment in the minerals and metals sector: a critical review of selected issues and challenges. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 14, p.257 – 267, 2009.

APÊNDICE

**mass of the impact**  
 $\%m = \frac{\text{mass of the impact}}{\Sigma \text{ mass of all impacts}}$

**S = 1 + (%m) x WFC**

FMEA & Life cycle inventory - Primary AI									
Material / Energy / Emissions	Unit	Primary AI	Impact Category	%m or %E	WFC	S	D	D	RPN
Bauxite ore	kg	4180	A	0,116809	10	2	10	1	22
Coal	kg	5,72	A	0,00016	10	1	10	1	10
Petroleum coke	kg	590	A	0,016487	10	1	10	1	12
Nitrogen	kg	2,91	A	8,13E-05	5	1	10	4	40
Fresh water	kg	10480	A	0,29286	5	2	10	1	25
Petroleum pollutants	kg	0,00659	C	2E-07	5	1	10	9	90
SO <sub>2</sub>	kg	5,4	C	0,000151	5	1	10	9	90
Tetrafluoro methane	kg	0,26	C	7,3E-06	10	1	10	9	90
CO <sub>2</sub>	kg	18400	C	0,514181	10	6	10	9	553
Overhaul waste residues	kg	13,22	E	0,000369	10	1	10	5	50
Red mud	kg	1130	D	0,031577	10	1	10	5	66
Electricity consumption	kWh	1,51x10 <sup>4</sup>	B	1	10	10	8	2	160

**RPN = 0 x S x D**

The detection of these material is guaranteed  
**D = 1**

(A) ==> Consumption of material  
Non-renewable source ==> WFC = 10

(A) ==> Consumption of material  
Renewable source ==> WFC = 5

(C) ==> Atmospheric emissions  
Does not contribute to the greenhouse effect ==> WFC = 5

(C) ==> Atmospheric emissions  
Contributes to the greenhouse effect ==> WFC = 10

(E) ==> Solid waste  
Non-recyclable ==> WFC = 10

(D) ==> Fluid waste  
There is no treatment ==> WFC = 10

(B) ==> - Consumption of energy  
Non-renewable source ==> WFC = 10

Atmospheric emissions are very hard to detect  
**D = 9**

A planilha apresentada, elaborada pelo autor, funciona como um tutorial prático, explicando como inserir e qualificar os índices FMEA no inventário ACV. O objetivo é demonstrar quais são os impactos mais críticos relacionados à sustentabilidade ambiental, uma vez que uma análise simples da ACV pode apresentar incertezas quanto às unidades de medida, estados físicos dos materiais, etc. Para essa aplicação da FMEA, algumas adaptações precisam ser feitas. Os modos de falhas não devem ser tratados como defeitos mecânicos ou do processo. Estes são definidos como impactos causados pelo consumo de cada matéria-prima envolvida no ciclo de vida do produto, além de suas respectivas emissões e gastos energéticos.

A título de exemplo, serão explicadas as classificações de dois itens da planilha tutorial: a bauxita e o gás carbônico. Assim, espera-se que a compreensão da qualificação FMEA x ACV possa ser simplificada e sirva de exemplo para outros estudos.

### **Bauxita**

- 1- Trata-se de uma material que é consumido durante o processo, portanto recebe a classificação (A) – Consumo de Material.
- 2- Por se tratar de recurso não renovável, recebe um WFC = 10, relativo aos impactos mais severos.
- 3- Com a %m calculada e o WFC definido, calcula-se, por meio da equação (8) o índice de severidade (IS) = 2.
- 4- Classifica-se o (IO), índice de ocorrência, como 10, taxa máxima, pois para se produzir o alumínio primário sempre ocorrerá a extração da bauxita, ou seja, a frequência do impacto é inerente à fabricação do metal.
- 5- A detecção da bauxita é garantida, basta uma balança de grande porte para mensurar a quantidade de massa do minério que é utilizada no processo. Por essa simplicidade, recebe uma taxa mínima para o índice de detecção, (ID) = 1.
- 6- Por fim, mediante a aplicação da equação (9), de posse dos três índices, calcula-se o RPN da bauxita, com as devidas aproximações decimais.

## **Gás Carbônico - CO<sub>2</sub>**

- 1- Trata-se da emissão de um gás resultante do processo, portanto recebe a classificação (C) – Emissões Atmosféricas.
- 2- Por se tratar de um gás contribuinte para o agravamento do efeito estufa, recebe um WFC = 10, relativo aos impactos mais severos.
- 3- Com a %m calculada e o WFC definido, calcula-se, por meio da equação (8) o índice de severidade (IS) = 6.
- 4- Classifica-se o (IO), índice de ocorrência, como 10, taxa máxima, pois para se produzir o alumínio primário sempre ocorrerá a emissão de CO<sub>2</sub>, ou seja, a frequência do impacto é inerente à fabricação do metal.
- 5- A detecção do gás carbônico é muito difícil, uma vez que as moléculas são medidas em ppm (partes por milhão). Equipamentos modernos são necessários para a mensuração da quantidade de gás carbônico emitida no processo. Por esses requisitos, o item recebe uma taxa alta para o índice de detecção, (ID) = 9.
- 6- Por fim, mediante a aplicação da equação (9), de posse dos três índices, calcula-se o RPN do CO<sub>2</sub>, com as devidas aproximações decimais.