



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Henrique Guilherme da Silva

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FABRICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO  
CINZENTO COM ADIÇÃO DE NIÓBIO PROVENIENTE DE SUCATA**

Florianópolis – SC

2024

Henrique Guilherme da Silva

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FABRICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO  
CINZENTO COM ADIÇÃO DE NIÓBIO PROVENIENTE DE SUCATA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Florianópolis – SC

2024

da Silva, Henrique Guilherme  
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FABRICAÇÃO DE FERRO  
FUNDIDO CINZENTO COM ADIÇÃO DE NIÓBIO PROVENIENTE DE SUCATA  
/ Henrique Guilherme da Silva ; orientador, João Carlos  
Espíndola Ferreira, 2024.  
158 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Fundição. 3. Ferro Fundido. 4.  
Sustentabilidade. 5. Materiais reciclados. I. Espíndola  
Ferreira, João Carlos . II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
III. Título.

Henrique Guilherme da Silva

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FABRICAÇÃO DE FERRO FUNDIDO CINZENTO  
COM ADIÇÃO DE NIÓBIO PROVENIENTE DE SUCATA**

O presente trabalho em nível de Pós-Graduação foi avaliado e aprovado, em de março de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC

Prof. André Ogliari, Dr.Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC

Profa. Marina Bouzon, Dr.Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC

Prof. Amauri Hassui, Dr.Eng.  
Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Henrique Simas, Dr.Eng.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.  
Orientador

Florianópolis, 2024

*Esta tese é dedicada aos meus pais Joana  
D'arc e José Roberto e aos meus irmãos Michel e  
Anna Beatriz que sempre foram o meu maior apoio  
e inspiração, além do meu porto seguro durante  
todos os desafios desta pesquisa.  
Vocês são minha luz e eu amo muito vocês.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me guiar todos os dias e me abençoar com mais esta conquista.

Ao meu pai, José Roberto da Silva, e minha mãe Joana D'arc Caide, e meus irmãos Michel Felipe Silva, Anna Beatriz Silva e toda minha família, por todo amor e por acreditarem que eu alcançaria mais esta conquista na minha vida, além da compreensão e apoio financeiro.

Ao meu orientador, professor João Carlos Espíndola Ferreira, por estar sempre disponível e auxiliar a encontrar a solução nos momentos de dificuldade.

A todos com quem dividi momentos de êxito e dificuldades na vida e durante toda esta jornada acadêmica, em especial aos meus queridos amigos Tamile Kelm, Renato Sene, Gustavo Dias, Kaio Cesar, Paola Boada, Ygor Marca, Marlene Marca, Natan Bernardo, Caroline Dorneles, Emanuelle Perine, Camila Valgas, Evelyn Sagiorato, Natália Chagas, Fernanda Borchardt, Clarianne Natali, Eduardo Deliza, Felipe Pietrovski, Isadora Malohlava, Rosana Henriques, Rodrigo Amorim, Ricardo Vessoni, Ivete Balen, Otávio Gobbo e Ariane Batista.

A todos os profissionais das empresas participantes, pelo interesse, informação, atenção e tempo disponibilizado para que os objetivos desta pesquisa fossem alcançados.

A CAPES e a UNIEDU pelo financiamento da bolsa de pesquisa.

## RESUMO

Tendo em vista a degradação ambiental, a sustentabilidade tem se tornado cada vez mais importante e, nesse contexto, o setor industrial desempenha um papel significativo. A sustentabilidade está associada a análises econômicas, ambientais e sociais ao longo do ciclo de vida do produto, desde a extração de matérias-primas até o pós-uso do produto. Um processo industrial importante é a fundição, para a qual muitas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos para melhorar as propriedades mecânicas dos materiais. No entanto, a fundição consome muitos recursos naturais e gera resíduos sólidos, líquidos e gasosos, além de consumir uma elevada quantidade de água e eletricidade. Diante desse cenário, nesta pesquisa foram investigados alguns aspectos do comportamento de uma liga de ferro fundido com adição de nióbio proveniente de materiais reciclados. Foi efetuada a avaliação do ciclo de vida (ACV) para determinar os impactos ambientais gerados nesse processo, sendo utilizado o software de código aberto OpenLCA junto com o banco de dados EcolInvent e os métodos CML e RECIPE. Em ambos os métodos se observou que o processo que utiliza material reciclado teve menor impacto ambiental. O processo que utiliza material reciclado teve um impacto de aquecimento global igual a  $1,07 \times 10^{+01}$  kg CO<sub>2</sub> eq em comparação com  $4,67 \times 10^{+03}$  kg CO<sub>2</sub> eq do processo que utiliza materiais novos. Usando-se o método RECIPE, a formação de ozônio (saúde humana) teve um valor de  $1,09 \times 10^{+01}$  kg NO<sub>x</sub> eq para o processo com material reciclado, enquanto teve  $1,63 \times 10^{+01}$  kg NO<sub>x</sub> eq para materiais novos e, no caso de escassez de recursos minerais, o valor foi igual a  $2,13 \times 10^{+02}$  kg cobre eq usando-se material reciclado, e  $2,01 \times 10^{+03}$  kg cobre eq para o processo usando-se materiais novos. Foi avaliada a usinabilidade do ferro fundido cinzento com adição de nióbio reciclado, usando-se insertos com gumes novos no fresamento de corpos de prova com 0,8% de adição de nióbio reciclado. Foram realizadas 10 passadas da ferramenta e, depois, foi avaliado o desgaste de flanco (visualização com microscópio eletrônico de varredura - MEV), tendo sido encontrado um desgaste de flanco de 0,548 mm.

**Palavras-chave:** Fundição; Manufatura Sustentável; Ferro Fundido; Impactos Ambientais.

## ABSTRACT

In view of environmental degradation, sustainability has become increasingly important and, in this context, the industrial sector plays a significant role. Sustainability is associated with economic, environmental and social analyzes throughout the product's life cycle, from the extraction of raw materials to the post-use of the product. An important industrial process is casting, for which many techniques have been developed over the years to improve the mechanical properties of materials. However, casting consumes many natural resources and generates solid, liquid and gaseous waste, in addition to consuming a large amount of water and electricity. Given this scenario, in this research some aspects of the behavior of a cast iron alloy with the addition of niobium from recycled materials were investigated. A life cycle assessment (LCA) was carried out to determine the environmental impacts generated in this process, using the open source software OpenLCA together with the Ecoinvent database and the CML and Recipe methods. It was observed in both methods that the process using recycled material had a lower environmental impact. The process using recycled material had a global warming impact equal to  $1.07 \times 10^{+01}$  kg CO<sub>2</sub> eq compared to  $4.67 \times 10^{+03}$  kg CO<sub>2</sub> eq of the process using new materials. Using the Recipe method, ozone formation (human health) had a value of  $1.09 \times 10^{+01}$  kg NO<sub>x</sub> eq for the process with recycled material, while it had  $1.63 \times 10^{+01}$  kg NO<sub>x</sub> eq for new materials and, in the case of scarcity of mineral resources, the value was equal to  $2.13 \times 10^{+02}$  kg copper eq using recycled material, and  $2.01 \times 10^{+03}$  kg copper eq for the process using new materials. The machinability of gray cast iron with the addition of recycled niobium was evaluated, using inserts with new cutting edges when milling specimens with 0.8% addition of recycled niobium. The tool performed ten passes, and then the flank wear was evaluated (using a scanning electron microscope - SEM), and a flank wear of 0.548 mm was found.

**Keywords:** Foundry; Sustainable Manufacturing; Cast Iron; Environmental Impacts.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b> Emissões dos setores industriais no Brasil de 1990 a 2020 em Gg CO <sub>2</sub> eq .....	23
<b>Figura 2-</b> Tripé da sustentabilidade .....	27
<b>Figura 3-</b> Rota ambiental a ser seguida por uma empresa.....	30
<b>Figura 4-</b> Ciclo de vida do produto.....	34
<b>Figura 5-</b> Quadro de Avaliação de Ciclo de Vida .....	40
<b>Figura 6-</b> Estrutura da ACV .....	41
<b>Figura 7-</b> Principais categorias de impactos e modelos de caracterização para ACV .....	46
<b>Figura 8-</b> Efeito do fósforo (%) na formação de steadita no ferro fundido cinzento. .	50
<b>Figura 9-</b> Matriz ferrita-perlita em ferro fundido nodular .....	51
<b>Figura 10-</b> Diagrama de equilíbrio ferro-carbono.....	54
<b>Figura 11-</b> Diagrama ferro-carbono (estável e metaestável) para ferros fundidos....	55
<b>Figura 12-</b> (a) Grafita tipo A em ferro fundido cinzento inoculado; (b) grafita tipo D em amostra não inoculada. ....	58
<b>Figura 13-</b> Efeito de inoculação no limite de resistência.....	58
<b>Figura 14-</b> Desgastes de flanco e de cratera.....	67
<b>Figura 15-</b> Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte .....	69
<b>Figura 16-</b> Etapas aplicadas no desenvolvimento deste trabalho.....	73
<b>Figura 17-</b> Composição química do ferro fundido.....	81
<b>Figura 18-</b> Béquer com nióbio reciclado .....	81
<b>Figura 20-</b> Moldes com metal vazado.....	83
<b>Figura 21-</b> Retirada de amostra.....	83
<b>Figura 22-</b> Blocos fundidos.....	84
<b>Figura 23-</b> Amostras embutidas.....	85
<b>Figura 24-</b> Microscópio óptico Leica LDM6 & LDM7.....	85
<b>Figura 25-</b> Fresadora ferramenteira Sinitron (2010) .....	86
<b>Figura 26-</b> Microscópio eletrônico de varredura .....	87
<b>Figura 27-</b> Medidor de nível sonoro.....	87
<b>Figura 28-</b> Rugosímetro de bancada .....	88
<b>Figura 29-</b> Separador de material.....	88

<b>Figura 30-</b> Limites do sistema considerado para a produção da peça .....	90
<b>Figura 31-</b> Amostras embutidas para análise .....	92
<b>Figura 32-</b> Amostra 01 (0,2% Nb).....	93
<b>Figura 33-</b> Amostra 02 (0,6% Nb).....	94
<b>Figura 34-</b> Amostra 03 (0,8% Nb).....	96
<b>Figura 35-</b> Cabeçote de fresamento utilizado nos ensaios .....	97
<b>Figura 36-</b> Imagens dos insertos (MEV) mostrando o desgaste de flanco em diferentes insertos .....	98
<b>Figura 37-</b> Valores de desgastes VB para a aresta usada de cada inserto (mm)...	100
<b>Figura 38-</b> Nível de pressão sonora sobre o operador durante 120 segundos no fresamento (dB X tempo em segundos).....	101
<b>Figura 39-</b> Resultado para depleção abiótica em kg antimônio equivalente.....	106
<b>Figura 40-</b> Resultado para o impacto de acidificação em kg SO <sub>2</sub> equivalente .....	106
<b>Figura 41-</b> Resultado para eutrofização em kg PO <sub>4</sub> equivalente .....	108
<b>Figura 42-</b> Resultado para o impacto de ecotoxicidade da água doce em kg 1,4-DB (diclorobenzeno) equivalente. ....	110
<b>Figura 43-</b> Resultado para o impacto de aquecimento global em kg CO <sub>2</sub> equivalente .....	112
<b>Figura 44-</b> Resultado para o impacto de toxicidade humana em kg 1,4-DB (diclorobenzeno) equivalente .....	114
<b>Figura 45-</b> Resultado do impacto de oxidação fotoquímica em kg etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) equivalente .....	117
<b>Figura 46-</b> Resultado do impacto de ecotoxicidade terrestre em kg 1,4-DB equivalente .....	119
<b>Figura 47-</b> Resultado para formação de partículas finas em kg PM <sub>2,5</sub> eq.....	123
<b>Figura 48-</b> Resultado para o impacto de escassez de recursos fósseis em kg petróleo eq. ....	124
<b>Figura 49-</b> Resultados para o impacto de ecotoxicidade de água doce em kg 1,4-DB eq .....	125
<b>Figura 50-</b> Resultado para o impacto de aquecimento global em kg CO <sub>2</sub> eq .....	126
<b>Figura 51-</b> Resultado para impacto da formação de ozônio em kg NO <sub>x</sub> eq. ....	128
<b>Figura 52-</b> Resultados para a escassez de recursos minerais em kg Cobre eq.....	131
<b>Figura 53-</b> Gráfico normalizado RECIPE Novo X Reciclado.....	136

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Valores de entrada e saída para o processo de fundição .....	91
<b>Tabela 2-</b> Percentual de nióbio .....	92
<b>Tabela 3-</b> Rugosidade das amostras ( $\mu\text{m}$ ) .....	102
<b>Tabela 4-</b> Impactos resultantes do processo usando-se material novo .....	104
<b>Tabela 5-</b> Resultado dos impactos para material novo usando-se o método RECIPE .....	120
<b>Tabela 6-</b> Resultados dos impactos para material reciclado usando-se o método RECIPE .....	121

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1-</b> Evolução dos objetivos da produção .....	33
<b>Quadro 2</b> - Princípios da manufatura sustentável.....	36
<b>Quadro 3-</b> Categorias de impacto método RECIPE .....	48
<b>Quadro 4-</b> Fases para a obtenção das peças fundidas .....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Ba	<i>Bário</i>
Cd	Cádmio
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Ferro
N	Nitrogênio
Nb	Nióbio
NBR	Norma Brasileira
P	Fósforo
Pb	Chumbo
Sr	Estrôncio
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UFSC	Universidade Federal e Santa Catarina
Zr	Zircônio

## LISTA DE UNIDADES

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
eq	Equivalente
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
g	Gramma
kg m <sup>-3</sup>	Quilograma por metro cúbico
l	Litro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
mg l	Miligramma por litro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
µm	Micrometro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	21
1.3	OBJETIVOS	24
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>24</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>25</b>
2.1	MANUFATURA SUSTENTÁVEL	25
2.2	O TRIPÉ DA SUSTENTABILIDADE E SUAS DIMENSÕES	26
<b>2.2.1</b>	<b>A dimensão ambiental</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2</b>	<b>A dimensão econômica</b>	<b>29</b>
<b>2.2.3</b>	<b>A dimensão social</b>	<b>32</b>
<b>2.2.4</b>	<b>A sustentabilidade na manufatura</b>	<b>33</b>
<b>2.2.5</b>	<b>A avaliação do ciclo de vida</b>	<b>37</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Avaliação dos impactos do ciclo de vida nos processos</b>	<b>41</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Método CML</b>	<b>44</b>
<b>2.2.8</b>	<b>Método RECIPE</b>	<b>47</b>
<b>2.2.9</b>	<b>Quantificação de informações do processo de fundição no LCA</b>	<b>49</b>
<b>2.2.10</b>	<b>Ferro fundido</b>	<b>49</b>
2.2.10.1	TIPOS DE FERRO FUNDIDO	52
2.2.10.2	Fatores preponderantes na determinação da estrutura do ferro fundido	52
2.2.10.3	Solidificação do ferro fundido	53
2.2.10.4	Fundição e o processo de inoculação do ferro fundido	56
<b>2.2.11</b>	<b>Tipos de Inoculantes</b>	<b>59</b>
2.2.11.1	Nióbio e Ferro Fundido	60
2.2.11.2	Usinabilidade	63
2.2.11.3	Efeito da microestrutura na usinabilidade do ferro fundido	63
2.2.11.4	Ferramentas para usinagem de ferro fundido	64
2.2.11.5	Medição do desgaste de ferramenta	67
2.2.11.6	Mecanismos de desgaste da ferramenta	68

2.2.11.7 Projeto Inicial.....	70
2.2.11.8 Seleção de Materiais.....	71
2.2.11.9 Fabricação de Moldes e Modelos.....	71
2.2.11.10 Processo de Fundição.....	71
2.2.11.11 Inspeção de Qualidade.....	71
2.2.11.12 Análise de Desempenho.....	72
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>73</b>
<b>4 ETAPAS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DAS PEÇAS.....</b>	<b>80</b>
4.1 FUNDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	80
4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA.....	84
4.3 ENSAIO DE USINABILIDADE.....	86
4.4 MEDIÇÃO DO NÍVEL SONORO.....	87
4.5 MEDIÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	88
4.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	88
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>92</b>
5.1 ANÁLISE METALOGRAFICA.....	92
<b>5.1.1 Amostra 01.....</b>	<b>93</b>
<b>5.1.2 Amostra 02.....</b>	<b>94</b>
<b>5.1.3 Amostra 03.....</b>	<b>95</b>
5.2 ENSAIO DE USINABILIDADE.....	97
<b>5.2.1 Desgaste de flanco da ferramenta.....</b>	<b>97</b>
<b>5.2.2 Resultados para os níveis de ruídos.....</b>	<b>100</b>
<b>5.2.3 Resultados para acabamento superficial.....</b>	<b>102</b>
5.3 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV).....	102
<b>5.3.1 Resultados usando-se o CML.....</b>	<b>103</b>
5.3.1.1 Depleção abiótica.....	103
5.3.1.2 Acidificação.....	106
5.3.1.3 Eutrofização.....	107
5.3.1.4 Ecotoxicidade em água doce.....	110
5.3.1.5 Aquecimento Global.....	112
5.3.1.6 Toxicidade humana.....	113
5.3.1.7 Depleção da camada de ozônio.....	115
5.3.1.8 Oxidação fotoquímica.....	116



5.3.1.9 Ecotoxicologia terrestre .....	118
<b>5.3.2 RESULTADO RECIPE .....</b>	<b>120</b>
5.3.2.1 Formação de partículas finas .....	122
5.3.2.2 Recursos fósseis .....	123
5.3.2.3 Ecotoxicidade em água doce .....	124
5.3.2.4 Aquecimento global .....	126
5.3.2.5 Formação de ozônio, saúde humana e ecossistema terrestre .....	127
5.3.2.6 Ecotoxicidade e eutrofização marinha .....	129
5.3.2.7 Depleção de ozônio, ecossistema terrestre.....	130
5.3.2.8 Escassez de recursos minerais.....	131
5.3.2.9 Toxicidade humana cancerígena e não cancerígena, radiação ionizante e uso da terra .....	132
5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS CML E RECIPE.....	133
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>137</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>141</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como alternativas às atuais práticas que norteiam a sociedade capitalista e industrializada, a sociedade encontrou no desenvolvimento sustentável uma motivação para que se efetuem alterações significativas nas práticas estabelecidas, com o objetivo de construir pilares de uma nova fase, com regras visando a sustentabilidade ambiental (ROMEIRO, 2012). O setor industrial consome uma grande quantidade de recursos naturais (HOCHSTETLER, 2002). Sobretudo as indústrias do setor metal mecânico ainda geram resíduos que podem se apresentar de diversas formas dentro dos estados sólido, líquido e gasoso (DA SILVA, 2017).

A manufatura de produtos consome elevados níveis de energia, desde a extração da matéria-prima, fabricação, transporte, uso e descarte. Portanto, estudos mais aprofundados relacionados à manufatura sustentável são muito importantes para que as empresas desenvolvam práticas adequadas para o planeta (DA SILVA, 2019; DA SILVA et al., 2020). Neste cenário, pode-se trabalhar com algumas alternativas para reduzir esse problema como, por exemplo, a modificação do projeto do produto, utilizando novas ligas e materiais, bem como procedimentos que minimizem a poluição e o excesso de resíduos.

Pesquisas apontam que 31,8% do consumo mundial de energia no ano de 2016 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015), e 32% das emissões de gases de efeito estufa (21% diretamente e 11% indiretamente pela produção de eletricidade e geração de calor) no ano de 2013 (PACHAURI et al., 2014) foram atribuídos ao setor industrial. Estas pesquisas apontam ainda que, devido à rápida industrialização, os países desenvolvidos, que correspondem a apenas 15% da população mundial, consomem 80% dos recursos naturais disponíveis no planeta (GOINDI; SARKAR, 2017). Por fazerem parte deste cenário, empresas de manufatura têm recebido crescente pressão para pensarem não somente nos benefícios econômicos de seus processos e produtos, mas considerarem também os efeitos ambientais e sociais dos mesmos.

Apesar de defender uma mudança sistêmica como solução, Capra (2009) aponta para a necessidade de uma legislação ambiental mais rigorosa, atividades

empresariais mais éticas e tecnologias mais eficientes. Assim, com a consciência global adquirida dos riscos ambientais, bem como as necessidades prementes de competir mediante a eficiência, é importante que os sistemas de manufatura estejam envolvidos no paradigma da sustentabilidade (DEIF, 2011).

No desenvolvimento e fabricação de novos produtos, a sustentabilidade é uma estratégia amplamente aceita em princípios, embora ainda não amplamente praticada. A integração das exigências ambientais e sociais durante todo o ciclo de vida de um produto necessita de uma nova forma de pensar e novas ferramentas de decisão a serem aplicadas (ZANUTO, 2016). Segundo o último senso mundial de produção de fundidos da revista MODERN CASTING em 2020, a produção mundial de fundidos alcançou 104,1 milhões de toneladas, e 87,32% desta produção concentra-se em 10 países.

No Brasil a produção de fundidos em 2023 foi de 2.699.175 toneladas, com projeção de crescimento para os próximos anos (ABIFA, 2023). A produção quase dobrou na última década, um comportamento que também foi observado no mundo (ABIFA, 2023). Nesse contexto, muitas pesquisas e desenvolvimentos têm sido feitos a fim da obtenção de processos mais eficientes e sustentáveis nos pontos de vista ambiental e econômico.

A fundição é uma atividade industrial essencial para a produção de uma vasta gama de produtos, incluindo peças de automóveis e utensílios domésticos (GUZIK et al., 2023). No entanto, seu processo de produção pode ter um impacto significativo no meio ambiente se não forem implementadas medidas adequadas de mitigação (GUZIK et al., 2023). Para mitigar esses impactos ambientais é fundamental buscar alternativas sustentáveis para a fundição como a reciclagem de materiais, e a utilização de técnicas que possam colaborar para a qualidade do material fundido, como a inoculação.

A inoculação é uma fase do processo tecnológico de produção de ferro dúctil que controla e melhora a microestrutura e propriedades mecânicas de peças fundidas. Por meio da inoculação, a nucleação de grafita eutética e o sub-resfriamento do fundido pode ser controlado, o que é crucial para alcançar as propriedades de uma peça fundida de qualidade. Com isto, um dos principais benefícios da inoculação é uma melhor usinabilidade do material, o que pode

contribuir para a redução do impacto ambiental causado pelo processo (AVDUSINOVIC et al., 2015).

A mineração urbana é um termo que, cada vez mais, vem ganhando força na procura de práticas sustentáveis na manufatura. A mineração urbana se refere à recuperação de materiais valiosos a partir de resíduos urbanos e industriais, como lixo eletrônico, sucata metálica e materiais de construção, para reutilização em processos industriais (GHISELLINI et al., 2022). A prática é sustentável inclusive para processos como a fundição pelas seguintes razões: (a) ela diminui a necessidade de extração de materiais virgens, reduzindo, assim, o impacto ambiental da mineração tradicional (PENGWEI; YASHAN, 2023); (b) ela diminui a quantidade de resíduos que vão para aterros sanitários, diminuindo, assim, a poluição e a ocupação de solo (SCHLEZAK; STYER, 2023).

A sucata de processamento industrial é gerada quando da utilização dos produtos siderúrgicos laminados e fundidos como matéria-prima na fabricação de bens, constituindo-se em resíduo decorrente da incapacidade dos processos produtivos de alcançar o pleno rendimento. O método para estimar essa geração de sucata origina-se de uma pesquisa direta junto aos setores consumidores de metais para determinar os índices de perdas nos processos produtivos (MME, 2009).

A reciclagem de metais contribui para a conservação dos recursos naturais: (a) devido à utilização de apenas 5% da energia elétrica; (b) por emitir somente 5% das emissões de gás de efeito estufa, em comparação com as emissões provocadas na produção de metal primário (OLATUNJI et al., 2018).

A sucata de ferro e aço representa uma alternativa promissora para a fundição, e tem o potencial de contribuir de forma significativa para os esforços globais em direção à neutralidade de emissões. Nesse contexto, é necessário preparar políticas comerciais adequadas e estratégias de economia circular para promover a eficiência global dos recursos (CAI et al., 2023).

Nesse contexto, conforme BOADA (2015), as tendências mundiais em sustentabilidade estão sendo inseridas nas empresas com o intuito de criar possibilidades em novos mercados e de serem incluídas em diretrizes estratégicas das empresas para os próximos anos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

O processo de fundição é conhecido por ser um dos mais antigos processos de fabricação. A fundição é um processo industrial que envolve a fusão de metais para criar peças e componentes utilizados em uma ampla gama de produtos, desde carros até utensílios domésticos. Ao longo dos anos foram desenvolvidas muitas técnicas a fim de melhorar as propriedades mecânicas do material obtido na fundição. Contudo, a fundição consome uma quantidade elevada de recursos naturais, gera muitos resíduos sólidos, emite poluentes no ar e consome muita água e energia elétrica (DA SILVA, 2019; DA SILVA et al., 2020; WANG et al., 2023).

No mercado de fundidos há um grande problema em substituir um tipo de material por outro com menor impacto ambiental, devido ao pouco conhecimento, falta de opções, além da demanda do cliente (DA SILVA, 2019; DA SILVA et al., 2020). Nesse contexto, propõe-se neste trabalho um estudo que visa calcular os efeitos da variação de nióbio reciclado de sucata à base FeSiNb, usando parâmetros de sustentabilidade no processo de fundição do material fundido. Também pretende-se nesta pesquisa investigar o comportamento mecânico do material obtido.

A utilização de material reciclável na fundição é uma prática importante e benéfica para a indústria metalúrgica e o meio ambiente (GONG et al., 2023).

Algumas vantagens e considerações importantes sobre a utilização de material reciclável na fundição:

- **Redução do impacto ambiental:**

A utilização de material reciclável, como sucata de metal, ajuda a reduzir a necessidade de mineração e extração de minérios. Isso contribui para a preservação dos ecossistemas naturais, diminui a degradação do solo e a poluição do ar e da água associada à mineração.

- **Economia de energia:**

A fundição de metal a partir de minérios virgens requer uma quantidade significativa de energia. O uso de material reciclável normalmente exige menos energia, o que pode resultar em reduções significativas nos custos de produção.

- **Redução de resíduos:**

A fundição tradicional gera uma quantidade considerável de resíduos e emissões poluentes. Ao utilizar sucata de metal como matéria-prima, reduz-se a quantidade de resíduos gerados e, conseqüentemente, os custos associados ao descarte desses resíduos.

- **Preservação de recursos naturais:**

A reciclagem de metais economiza recursos naturais valiosos, como minérios de ferro, alumínio e cobre. Isso prolonga a vida útil desses recursos e reduz a pressão sobre os ecossistemas vulneráveis.

- **Inovação e competitividade:**

Empresas que adotam práticas sustentáveis, como a utilização de material reciclável, muitas vezes são vistas de forma positiva pelos consumidores e investidores. Isso pode melhorar a imagem da empresa e sua competitividade no mercado.

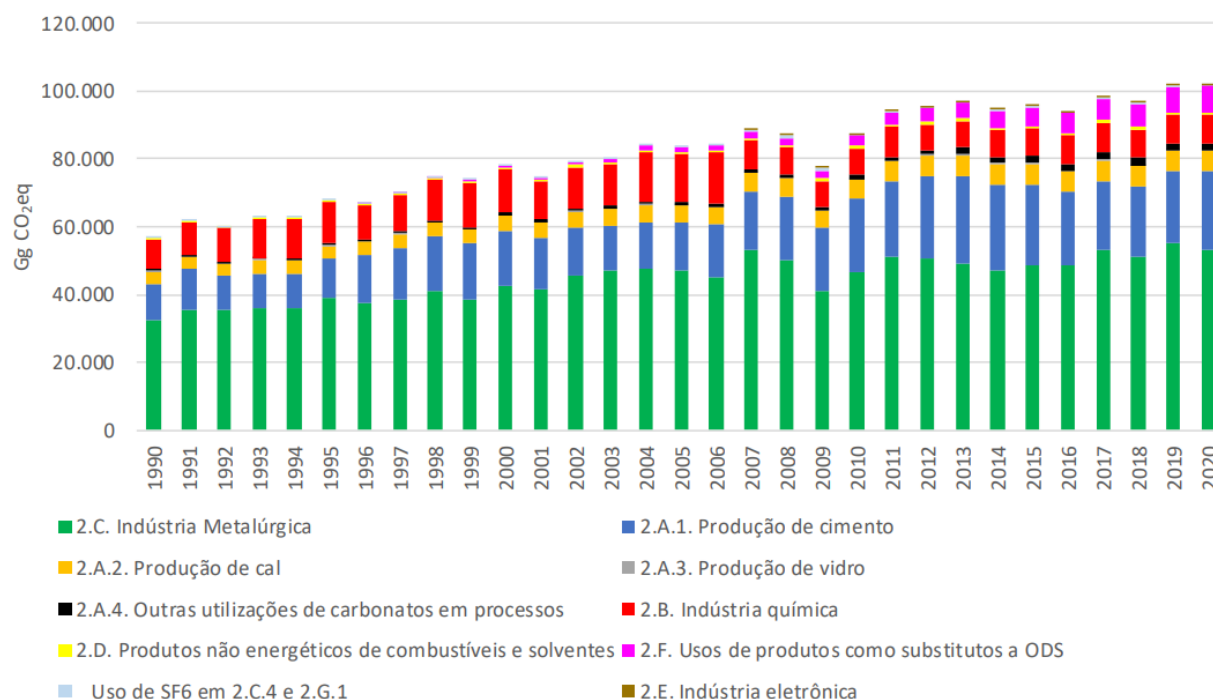
- **Normas ambientais e regulamentações:**

Muitos países estão implementando regulamentações mais rigorosas relacionadas às emissões de poluentes e ao uso sustentável de recursos. Utilizar material reciclável na fundição pode ajudar as empresas a cumprir essas regulamentações e evitar multas e sanções.

- **Desafios técnicos:**

A utilização de material reciclável na fundição pode apresentar desafios técnicos, pois a composição da sucata de metal pode variar. No entanto, avanços na tecnologia de fundição e na classificação de sucata têm facilitado a incorporação de material reciclável com sucesso.

O setor de processos industriais e uso de produtos do Brasil emitiu 101.936 Gg CO<sub>2</sub> eq em 2020, correspondendo a 6,1% das emissões nacionais em 2020 (MCTI, 2022). A Figura 1 mostra as emissões de CO<sub>2</sub> dos setores industriais no Brasil de 1990 a 2020, correspondendo a valores significativos, sendo a indústria metalúrgica (na cor verde na figura) aquela que emite mais CO<sub>2</sub> no Brasil (MCTI, 2022).

**Figura 1-** Emissões dos setores industriais no Brasil de 1990 a 2020 em Gg CO<sub>2</sub> eq

Fonte: MCTI, 2022

Tendo em vista que os processos de fundição fazem parte da indústria metalúrgica, a utilização de materiais recicláveis na fundição é importante de maneira a contribuir para a sustentabilidade da indústria metalúrgica. Deve-se notar também a utilização de nióbio, o qual tem sido utilizado geralmente em ferros fundidos brancos, com estudos promissores devido aos resultados alcançados (PAN et al., 2020). Portanto, estudos do efeito do nióbio em diferentes ferros fundidos são necessários.

Considera-se que a originalidade desta pesquisa reside na aplicação da avaliação do ciclo de vida (ACV) a um processo de fundição que incorpora materiais reciclados, mantendo o material fundido final com as mesmas características de um material fabricado com insumos novos, contribuindo para a mineração urbana, isto é, reduzindo-se a necessidade de extração de materiais novos.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Aplicar a avaliação do ciclo de vida na fabricação de ferro fundido cinzento com adição de materiais reciclados (incluindo Nióbio de sucata) avaliando-se os impactos ambientais, consumo energético e propriedades mecânicas do material.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para que os objetivos gerais sejam atingidos, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Adicionar nióbio, presente em materiais advindos de sucata, em uma liga de ferro fundido;
- Observar a microestrutura do ferro fundido por meio da análise metalográfica do material;
- Verificar o desgaste de flanco da ferramenta de corte na usinagem do material fundido.
- Verificar o acabamento superficial com auxílio de rugosímetro;
- Aplicar a ferramenta de avaliação de ciclo de vida (ACV) no processo de fundição do material mediante o software OpenLCA 2020, utilizando-se o inventário Ecoinvent e os métodos de categorias de impacto CML e RECIPE.



## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentadas algumas definições importantes sobre fundição, sustentabilidade, além de uma avaliação de indicadores aplicados aos sistemas de produção em função das dimensões econômica, ambiental e social, que compõem o tripé da sustentabilidade (BLOME et al., 2014).

Além disso, é apresentada uma breve revisão dos materiais considerados na pesquisa, incluindo suas principais propriedades mecânicas. São também apresentados os principais inoculantes utilizados na indústria de fundição, com um breve histórico da sua utilização, tipos e influência nas propriedades mecânicas e na usinagem do material.

### 2.1 MANUFATURA SUSTENTÁVEL

Na segunda metade do século 20, a busca pelo desenvolvimento econômico a qualquer preço, aliada à ideia de que os recursos naturais eram infinitos, promoveu o uso inadequado desses recursos, degradando a qualidade ambiental e comprometendo de forma significativa a sua preservação (COSTA, 2016).

No contexto de graves problemas socioambientais, surgiram mobilizações para encontrar um novo modelo de desenvolvimento que permitisse compatibilizar aspectos econômicos, sociais e ambientais (SCHLEMPER et al., 2015). Diante deste contexto, na década de 1970 um novo modelo de desenvolvimento econômico começava a surgir, o qual ficou conhecido em 1987 após a publicação de um relatório encomendado pelas Nações Unidas que tinha o objetivo de desenvolver um plano de longo prazo de desenvolvimento sustentável (COSTA, 2016).

O termo desenvolvimento sustentável foi publicado no livro *Our Common Future* em 1987, em um documento denominado Relatório Brundtland, elaborado pela *WCED - World Commission on Environmental Development*, em que este termo é definido como o “desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades” (DA SILVA, 2019). Logo, a expressão “desenvolvimento sustentável” foi cunhada visando incluir os processos decisórios e

políticos baseados na interdependência e complementaridade de crescimento econômico e preservação do meio ambiente (RAMOS, 2013). Embora o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade sejam expressões utilizadas de forma análoga, os mesmos não são sinônimos (LÉLÉ, 1991). Munck e Souza (2009) apontam que o desenvolvimento sustentável é considerado como uma meta mais ampla que a sustentabilidade.

O termo “desenvolvimento sustentável” é aceito como aquilo a ser alcançado pela soma e equilíbrio das ações e processos individuais e organizacionais, enquanto a sustentabilidade é considerada como o equilíbrio conquistado em cada ação e processo organizacional que vislumbre preocupações de longo prazo em seus cotidianos (FROES; BOYER, 2019).

## 2.2 O TRIPÉ DA SUSTENTABILIDADE E SUAS DIMENSÕES

Para Lorenzetti et al. (2008), o pilar econômico descreve a geração de riqueza pela e para a sociedade, mediante o fornecimento de bens duráveis e serviços. O pilar ambiental refere-se à conservação e ao manejo dos recursos naturais, enquanto o pilar social simboliza o alcance da igualdade e a participação de todos os grupos sociais na construção e manutenção do equilíbrio do sistema, compartilhando direitos e responsabilidades (BASTAS, 2021).

Ao se difundir o conceito de desenvolvimento sustentável discutido na Comissão de Brundtland, o qual buscou integrar os aspectos ambientais com os aspectos econômicos e sociais, houve oportunidade para a definição de um conceito importante conhecido como tripé da sustentabilidade (*Triple Bottom Line* - TBL) (KAZAKOVA; LEE, 2022; LEE et al., 2023).

Esse conceito foi inicialmente estabelecido por John Elkington no livro *Cannibals With Forks* (1994), no qual são incorporadas as dimensões social, ambiental e econômica na avaliação do desenvolvimento sustentável (SLAPER; HALL, 2011). As três dimensões que formam o tripé da sustentabilidade, representadas na Figura 2, serão detalhadas nas próximas seções.

**Figura 2-** Tripé da sustentabilidade

Fonte: Medium, 2024.

O tripé da sustentabilidade é um conceito fundamental, e sua importância só tem crescido à medida que o mundo enfrenta desafios cada vez mais complexos relacionados ao meio ambiente, economia e sociedade. Este modelo, também conhecido como os "Três P's" da sustentabilidade (*Planet, Profit e People* – Planeta, Lucro e Pessoas) serve como um guia valioso para orientar as ações e políticas que visam um futuro mais equilibrado e resiliente (SMITH et al., 2023).

- **Planeta:**

Em 2024, a preocupação com o meio ambiente continua a crescer à medida que as mudanças climáticas, a degradação dos ecossistemas e a perda de biodiversidade se tornam questões mais urgentes. O pilar "Planeta" do tripé da sustentabilidade destaca a importância de proteger o meio ambiente. Isso inclui a transição para fontes de energia renovável, a conservação dos recursos naturais, a redução do desperdício e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis (JOHNSON et al., 2023). A conscientização sobre a pegada de carbono e o uso responsável dos recursos naturais é mais crucial do que nunca.

- **Lucro:**

Em 2024, a economia global está passando por uma transformação significativa, impulsionada pela crescente demanda por empresas socialmente responsáveis e éticas. O pilar “Lucro” do tripé da sustentabilidade enfatiza que o sucesso econômico deve estar alinhado com práticas de negócios sustentáveis.

Empresas estão cada vez mais adotando modelos de negócios que consideram não apenas o lucro financeiro, mas também os impactos sociais e ambientais de suas operações. Investimentos em tecnologias verdes, cadeias de suprimentos éticas e estratégias de economia circular são apenas alguns exemplos de como as empresas estão integrando a sustentabilidade em suas práticas (KHAN et al., 2023).

- **Pessoas:**

Em 2024, a ênfase na inclusão social, equidade e justiça é mais proeminente do que nunca. O pilar "Pessoas" do tripé da sustentabilidade destaca a importância de atender às necessidades das comunidades, promovendo a igualdade e respeitando os direitos humanos. Isso inclui a promoção da inclusão no local de trabalho, o acesso à educação e cuidados de saúde de qualidade, e o fortalecimento das redes de segurança social. A pandemia de COVID-19 ressaltou a importância de sistemas de saúde resilientes e de uma abordagem centrada nas pessoas para enfrentar crises globais.

Em resumo, o tripé da sustentabilidade continua a ser um guia vital em 2024 para moldar um mundo mais equilibrado e sustentável. À medida que se enfrenta desafios complexos e interconectados, é essencial considerar o impacto das ações das pessoas ações no planeta, nas economias e nas comunidades. Somente ao abordar esses três pilares de forma integrada, pode-se verdadeiramente desenvolver atividades visando um futuro sustentável e próspero para todos.

Um detalhamento das três dimensões do tripé da sustentabilidade é efetuado nas próximas seções.

### **2.2.1 A dimensão ambiental**

A proteção ao meio ambiente é uma missão de toda a coletividade, como consta na Constituição Federal de 1988, em seu artigo 225, que dispõe que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (PRINTES, 2012).

Foi a partir deste artigo que, em agosto de 2010, a Lei 12.305 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (DA SILVA, 2017). Tal lei prevê princípios e objetivos básicos que tentam assegurar a proteção ao meio ambiente, inclusive reforçando em seus artigos 30 a 33 a responsabilidade compartilhada entre o poder público, fornecedores de produtos e consumidores, sobre o ciclo de vida dos produtos, suas embalagens, e a forma correta do descarte de produtos como pilhas, pneus, óleos, lâmpadas, eletrônicos e demais componentes (SCHLICKMANN, 2015).

Com o intuito de estabelecer a dimensão ambiental no setor industrial, um estudo feito por Robinson (2013) apurou a necessidade de ações ambientais para que as empresas caminhem do chamado “estado atual de produção” para o que os autores definem como “estado melhorado”. A Figura 3 representa essa “rota ambiental” por meio dos diferentes níveis de produção, em que essas ações foram implementadas relacionando os benefícios ambientais (eixo vertical) com as economias e o valor da empresa (eixo horizontal).

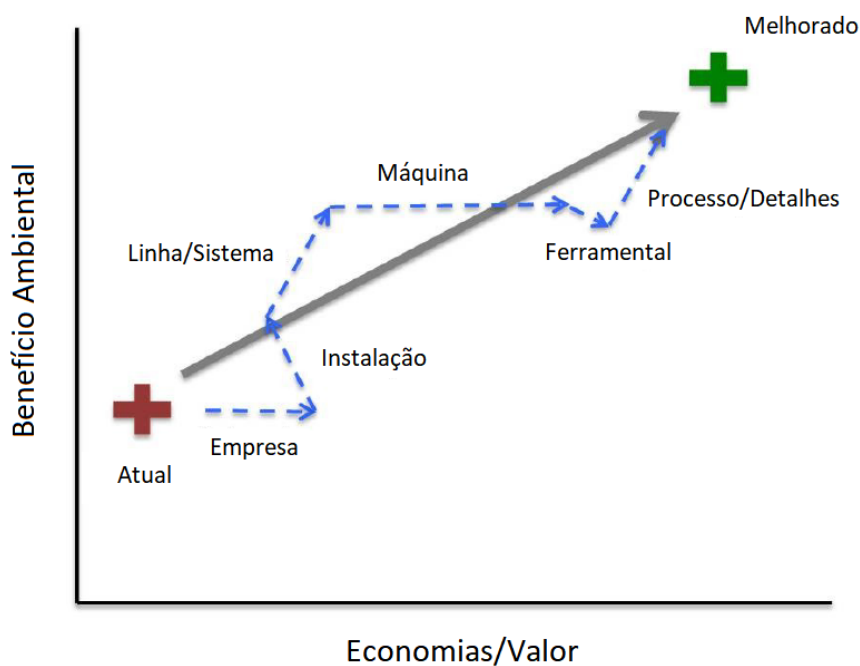
Percebe-se que, para cada nível em avaliação, desde uma análise corporativa, passando pelos níveis da empresa, linha/sistema, máquinas e ferramentais, até estudos focados em processos e detalhes, as ações de caráter ambiental tendem a proporcionar ganhos econômicos para a empresa.

### **2.2.2 A dimensão econômica**

A dimensão econômica do tripé da sustentabilidade desempenha um papel fundamental na busca por um futuro mais equilibrado e duradouro para nosso planeta e suas sociedades. A dimensão econômica representa o alicerce financeiro

que sustenta os outros dois pilares, enquanto também é influenciada por eles (RODRIGUEZ et al., 2023).

**Figura 3-** Rota ambiental a ser seguida por uma empresa.



**Fonte:** Robinson, 2013.

A sustentabilidade econômica se concentra na criação de sistemas econômicos que sejam capazes de satisfazer as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades. Isso envolve o desenvolvimento de uma economia resiliente e eficiente, que gere riqueza e bem-estar de forma equitativa e responsável. A seguir estão alguns aspectos essenciais dessa dimensão (ver, por exemplo, Linser e Lier, 2020):

- **Crescimento Sustentável:** Em vez de buscar o crescimento econômico indiscriminado, a sustentabilidade econômica promove o crescimento sustentável, que considera os limites dos recursos naturais e procura minimizar os impactos negativos no meio ambiente;

- **Eficiência de Recursos:** A utilização eficiente dos recursos é fundamental para garantir a sustentabilidade econômica. Isso inclui a redução do desperdício, o aumento da eficiência energética e a adoção de práticas de produção e consumo mais conscientes;
- **Inovação e Tecnologia:** A inovação desempenha um papel crítico na busca por soluções econômicas sustentáveis. Novas tecnologias e modelos de negócios podem ajudar a reduzir a pegada ambiental e promover a eficiência econômica;
- **Redução da Desigualdade:** Uma economia verdadeiramente sustentável deve se preocupar com a equidade. Isso envolve a redução das desigualdades de renda, acesso a recursos e oportunidades econômicas;
- **Investimento em Educação:** A formação de uma força de trabalho qualificada é essencial para o crescimento econômico sustentável. Investir em educação e treinamento é um componente fundamental dessa dimensão;
- **Transição para Energias Renováveis:** A mudança de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis para fontes renováveis é uma parte crítica da sustentabilidade econômica, reduzindo a dependência de recursos finitos e mitigando as mudanças climáticas;
- **Mercados Sustentáveis:** A criação de mercados que valorizam produtos e serviços sustentáveis é um catalisador para a sustentabilidade econômica. Isso pode ser incentivado por políticas governamentais, regulamentações e conscientização do consumidor.

A dimensão econômica do tripé da sustentabilidade representa, portanto, a busca por uma economia que promova o bem-estar humano, proteja o meio ambiente e crie condições para o desenvolvimento sustentável em longo prazo. É um desafio complexo, mas fundamental, que requer a colaboração de governos, empresas e indivíduos para construir um futuro mais equilibrado e próspero para todos (RODRIGUEZ et al., 2023).

### 2.2.3 A dimensão social

A dimensão social do tripé da sustentabilidade desempenha um papel crucial, uma vez que se concentra no bem-estar das pessoas e na equidade social. Esta dimensão considera uma série de fatores interligados que influenciam a qualidade de vida das populações, abrangendo áreas como saúde, educação, emprego, moradia e participação cidadã.

No Brasil, assim como em muitos outros países, a dimensão social da sustentabilidade enfrenta desafios complexos. A desigualdade econômica e social é uma preocupação central, com grande parte da população enfrentando dificuldades de acesso a serviços básicos, como saúde e educação de qualidade. A urbanização descontrolada e a falta de moradia adequada são problemas persistentes, especialmente nas grandes cidades (KHAN et al., 2023).

No cenário global, a dimensão social da sustentabilidade se tornou ainda mais evidente com desafios como a pandemia de COVID-19. A crise de saúde pública expôs desigualdades profundas na capacidade de acesso a cuidados médicos e na segurança econômica das pessoas ao redor do mundo. Além disso, a degradação ambiental afeta significativamente as comunidades mais vulneráveis.

Para promover a dimensão social da sustentabilidade, são necessárias ações coordenadas em níveis local, nacional e internacional. Isso envolve a implementação de políticas que garantam o acesso igualitário a serviços essenciais, a criação de mais empregos e o fortalecimento da participação democrática. Além disso, é fundamental promover a educação e a conscientização sobre a importância da sustentabilidade e da responsabilidade social, capacitando as pessoas a agir de forma mais sustentável em suas vidas cotidianas.

Em resumo, a dimensão social do tripé da sustentabilidade é fundamental para a construção de um futuro mais justo e equitativo no Brasil e no mundo. A promoção do bem-estar das pessoas, a redução da desigualdade e o fortalecimento da coesão social são objetivos essenciais para alcançar um desenvolvimento sustentável que beneficie a todos, protegendo ao mesmo tempo nosso planeta e seus recursos.



### 2.2.4 A sustentabilidade na manufatura

O surgimento do conceito de sustentabilidade reflete uma mudança muito importante no pensamento global, forçando as empresas a modificar a abordagem na condução de suas operações comerciais. Com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento econômico, as empresas precisam restabelecer sua estratégia corporativa introduzindo e implementando práticas sustentáveis integradas. Pesquisadores consideram que a fabricação sustentável corresponde a práticas interorganizacionais que integram aspectos ambientais, econômicos e sociais em atividades operacionais e de negócios (HAMI et al., 2015).

Tal fato pode ser avaliado mediante o Quadro 1, em que Shahbazpour e Seidel (2006), adaptado por Schlickmann (2015), apresentam uma evolução das necessidades da sociedade, requisitos do mercado e objetivos da produção ao longo dos anos.

**Quadro 1-** Evolução dos objetivos da produção

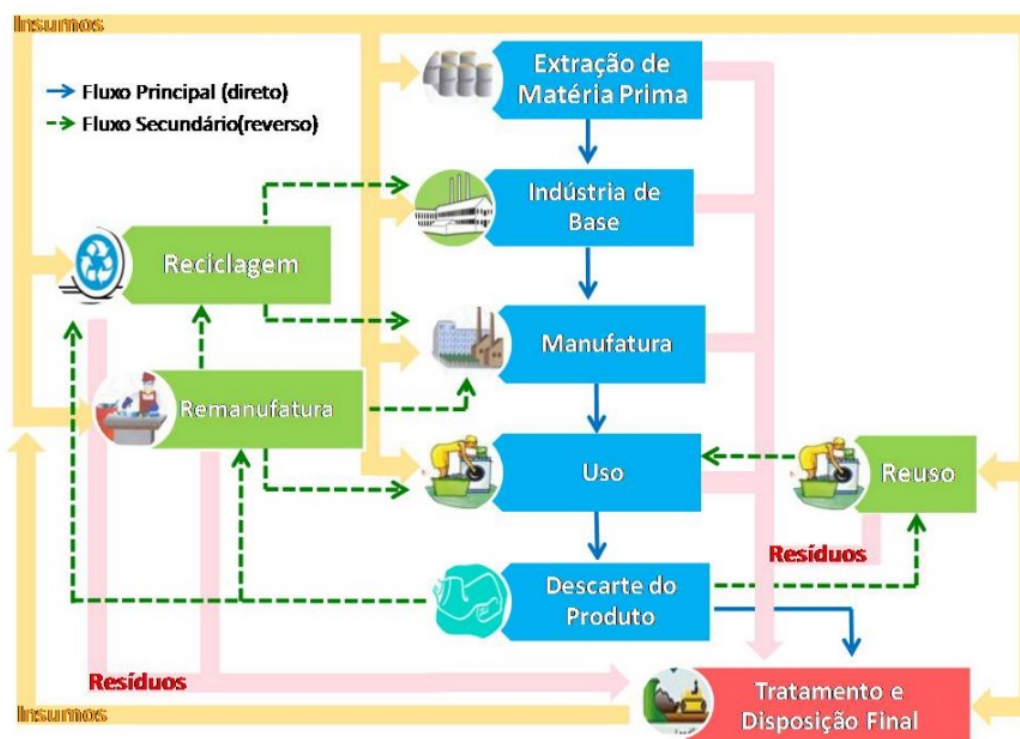
Paradigmas da manufatura	Produção artesanal	Produção em massa	Produção flexível	Personalização em massa	Produção sustentável
Início	~ 1850	1913	~1980	1995	2005
Necessidades da sociedade	Produtos customizados	Produtos com baixo custo	Produtos diversificados	Produtos customizados	Produtos ambientalmente sustentáveis
Requisitos do mercado	Volumes muito baixos	Demanda > oferta = demanda estável	Oferta > demanda = volumes menores	Demanda flutuante	Redução de consumo dos recursos naturais; Eficiência energética
Capacitadores de tecnologia	Eletricidade; Máquinas-ferramenta	Peças intercambiáveis; Linhas de montagem	Computadores; Sistemas de manufatura flexíveis	Tecnologia da informação; Internet	Reciclagem; Recuperação de energia
Objetivos da produção	Qualidade	Qualidade; Confiabilidade na entrega; Custo; Volume	Flexibilidade; Qualidade; Rapidez e confiabilidade na entrega; Custo; Volume	Sustentabilidade; Flexibilidade; Inovação; Qualidade; Rapidez e confiabilidade na entrega; Custo Volume	Sustentabilidade Flexibilidade; Inovação; Qualidade; Rapidez e confiabilidade na entrega; Custo Volume

Fonte: Schlickmann, 2015.

O objetivo das empresas é promover processos e produtos manufaturados que minimizem os impactos ambientais enquanto mantêm os benefícios sociais e econômicos. Esse desejo está sendo estendido para os consumidores, que, tendo em vista a preocupação cada vez maior com a preservação do planeta, almejam que seus produtos tenham sido fabricados de uma forma sustentável (HAANAES et al., 2011). Porém, ao se analisar todo o ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a extração da matéria-prima até o seu descarte, constata-se a possibilidade de implementação de vários estudos relacionados com o tema sustentabilidade.

Dessa forma, uma das primeiras considerações na delimitação de uma avaliação de desenvolvimento sustentável é a determinação de qual parte do ciclo de vida do produto será abordada (DORNFELD; HUTCHINS, 2013). A Figura 4 ilustra o ciclo de vida, incluindo a extração de matéria-prima, manufatura, transporte e distribuição, uso, reuso, remanufatura, reciclagem, e descarte. No âmbito deste trabalho será considerada a etapa de manufatura (fabricação) na avaliação da sustentabilidade.

**Figura 4-** Ciclo de vida do produto



Fonte: Pigosso et al., 2010.

Basicamente, os sistemas de produção sustentáveis precisam buscar a economia de recursos materiais, energia e água, redução no impacto ambiental das suas atividades, e os princípios de responsabilidade social para com os trabalhadores e a comunidade onde esse sistema de produção está inserido. O Quadro 2 apresenta os princípios de manufatura sustentável, tendo como fonte um estudo realizado por Veleva e Ellenbecker (2001).

**Quadro 2 - Princípios da manufatura sustentável.**

<b>Dimensão</b>	<b>Descrição</b>
Produtos e Serviços	Produtos e serviços devem causar pouco impacto ao meio ambiente e seguros ao longo do seu ciclo de vida.
	Produtos e serviços devem ser projetados para serem duráveis, reparáveis, recicláveis, compostáveis e facilmente biodegradáveis.
	Produtos e serviços devem ser produzidos e embalados com uma quantidade mínima de materiais e energia.
Processos	Os resíduos e subprodutos que causam danos ambientais devem ser eliminados, reduzidos ou reciclados.
	Substâncias químicas e agentes físicos que representam ameaças à saúde humana e ao meio-ambiente devem ser continuamente eliminados.
	O consumo de energia e uso de materiais devem ser reduzidos.
	O local de trabalho deve ser projetado para minimizar ou eliminar riscos físicos, químicos, biológicos e ergonômicos.
Trabalhadores	Seus trabalhos devem ser organizados para conservar e melhorar a eficiência e a criatividade.
	A segurança e o bem-estar são prioridades.
	Devem ser encorajados e auxiliados para continuamente desenvolver seus talentos e capacidades.
	Sua participação no processo de decisão deve ser incentivada.
Comunidade	As comunidades impactadas pela atividade produtiva devem ser respeitadas, e devem crescer nos aspectos econômicos, sociais, físicos e culturais.
	A justiça e a igualdade têm que ser promovidas.

**Fonte:** Veleva e Ellenbecker, 2001.

Ainda que uma empresa tenha o desejo de tornar a sua manufatura mais sustentável, a maior quantidade de controles e a necessidade por mudanças e

reestruturações internas nas suas operações fazem com que tal processo não seja rápido ou simples. Além disso, é necessária a adoção de estratégias que valorizem a sustentabilidade dos sistemas de produção, começando com estratégias mais imediatas, focadas em instalações eficientes, até chegar à própria revisão do modelo de negócio e análise da cadeia de suprimentos (ARAUJO, 2010). Porém, os desdobramentos positivos resultantes da produção sustentável atingem os colaboradores, consumidores, acionistas e, até mesmo, a comunidade envolvida com a empresa.

No Brasil, a sustentabilidade na manufatura é uma preocupação cada vez mais relevante na indústria brasileira. À medida que o mundo enfrenta desafios ambientais crescentes, como as mudanças climáticas e a escassez de recursos naturais, as empresas no Brasil estão buscando formas inovadoras de conciliar o crescimento econômico com a responsabilidade ambiental e social. Neste contexto, a sustentabilidade na manufatura desempenha um papel fundamental e, nesse contexto, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- **Eficiência Energética:** Uma das principais estratégias na busca pela sustentabilidade na manufatura é a melhoria da eficiência energética nas operações industriais. Isso inclui a adoção de tecnologias mais eficientes, o uso de energias renováveis e a implementação de práticas que reduzam o consumo de energia, contribuindo para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa.
- **Redução de Resíduos:** A gestão de resíduos é um aspecto crucial da sustentabilidade na manufatura. As empresas brasileiras estão investindo em processos de produção mais limpos e na reciclagem de materiais, reduzindo assim a quantidade de resíduos sólidos e contribuindo para a preservação dos recursos naturais.
- **Inovação Tecnológica:** A adoção de tecnologias inovadoras como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA) pode contribuir para um melhor controle e execução dos processos de produção, de maneira a aumentar a eficiência e reduzir o desperdício de recursos (TOMAZZOLI et al., 2023).

- **Certificações e Normas ambientais:** Muitas empresas brasileiras buscam certificações ambientais, como a ISO 14001, para garantir que suas operações atendam aos padrões de sustentabilidade reconhecidos internacionalmente. Isso não apenas mostra o compromisso com a sustentabilidade, mas também pode abrir portas para mercados internacionais.
- **Colaboração e Responsabilidade Social:** A sustentabilidade na manufatura não se limita apenas às práticas ambientais, mas também envolve a responsabilidade social. As empresas estão cada vez mais engajadas em iniciativas que beneficiam as comunidades locais, como programas de educação e treinamento, além de adotar práticas de negócios éticas e transparentes.
- **Economia Circular:** A transição para uma economia circular é uma tendência crescente na indústria brasileira. Isso envolve a reutilização, reparo e reciclagem de produtos e materiais, reduzindo a necessidade de recursos virgens e minimizando o descarte.
- **Conscientização e Educação:** A promoção da conscientização e da educação sobre a sustentabilidade entre os funcionários e a sociedade em geral desempenha um papel crucial. Isso envolve treinamento, campanhas de sensibilização e parcerias com instituições educacionais.

Em resumo, a sustentabilidade na manufatura é uma abordagem essencial para o desenvolvimento sustentável da indústria brasileira. As empresas estão reconhecendo cada vez mais os benefícios em longo prazo de operar de forma mais sustentável, não apenas em termos de redução de impactos ambientais, mas também de economia de recursos e aumento da competitividade nos mercados globais. A busca por soluções sustentáveis na manufatura está moldando o futuro da indústria no Brasil e contribuindo para um planeta mais saudável e equilibrado.

### 2.2.5 A avaliação do ciclo de vida

Nos últimos 20 anos houve um aumento significativo no interesse pela

avaliação do impacto ambiental das operações de manufatura. Este interesse é uma tendência bem-vinda em direção a práticas de negócios mais ecológicas e sustentáveis que vão além da mera observância regulamentar, indo no sentido de levar em consideração aspectos econômicos, ambientais e sociais (GUMUS et al., 2016). Além disso, nota-se mercados para fontes de energia alternativas e sustentáveis devido à escassez dos recursos naturais em todo o mundo (HOSSAIN et al., 2016).

Uma crescente importância dada à sustentabilidade representa uma mudança radical no mundo empresarial, o que obriga as empresas a rever sua forma de trabalhar. As empresas devem desenvolver estratégias que sejam compatíveis com os dias atuais, as práticas na fabricação e processos produtivos devem minimizar os impactos ambientais e maximizar as consequências socioeconômicas. O consumo sustentável é uma tendência comum entre consumidores, que cada vez mais valorizam produtos que são produzidos de forma sustentável (AHMADI-GH; BELLO-PINTADO, 2022; KJØDE et al., 2021)

A avaliação do ciclo de vida (ACV – *Life Cycle Assessment* - LCA) se desenvolveu rapidamente nas últimas três décadas. Considerando que a ACV evoluiu da análise meramente energética para uma análise abrangente de ônus ambiental na década de 1970, foram introduzidos modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida e modelos de custo de ciclo de vida nas décadas de 1980 e 1990.

A ACV social ganhou terreno na primeira década do século 21. Muitos dos desenvolvimentos mais recentes foram iniciados para ampliar a ACV tradicional para uma Análise de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (*Life Cycle Sustainability Assessment* - LCSA), que é mais abrangente (GUINÉE et al., 2011).

A ACV se tornou um instrumento reconhecido para avaliar os impactos ambientais ao longo de estágios consecutivos e interligados de um sistema de produção, desde a aquisição de matérias-primas a partir de recursos naturais, passando pela produção e uso, até o descarte final do produto (HELMERS et al., 2020). Em cada estágio, o ciclo de vida do produto interage com o meio ambiente, consumindo recursos naturais e emitindo poluentes.

Para Turk et al. (2015), todos os impactos estão associados aos fluxos de materiais e energia (ou seja, o uso de recursos naturais e requisitos energéticos), e são causados por emissões relacionadas ao ar e à água, e pela produção de

quaisquer tipos de resíduos sólidos. A metodologia da ACV é especialmente eficaz no caso de comparações de produtos.

A avaliação do ciclo de vida é um método quantitativo para descrever essas interações e seus potenciais impactos ambientais (MÜLLER et al., 2020). Mitterpach et al. (2017) menciona que a ACV é um método estruturado, abrangente e internacionalmente padronizado. A Figura 4 representa este ciclo, no qual são indicados os estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto.

Promover a sustentabilidade no setor industrial requer o desenvolvimento de métodos integrativos para realizar a interdisciplinaridade necessária (ABDELSHAFY et al., 2023). A Avaliação do ciclo de vida é uma técnica para quantificar os aspectos e impactos ambientais potenciais associados com um produto, ao longo de sua vida, desde a aquisição da matéria-prima até a produção, utilização e eliminação, sendo padronizada pelas ABNT NBR ISO 14040 (Princípios e Estrutura) e ABNT NBR ISO 14044 (Requisitos e Orientações) (DE SOUZA, 2016; DE SOUZA et al., 2019). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é amplamente reconhecida como o principal método para avaliar o impacto ambiental. No entanto, a perspectiva padrão da ACV se concentra principalmente no aspecto ambiental (LUZ, 2017). De acordo com essas padronizações, uma avaliação do ciclo de vida deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos 19 resultados. A Figura 5 mostra o quadro de avaliação do ciclo de vida e as suas principais aplicações.

Para a execução de uma ACV deve-se: (a) especificar a aplicação pretendida; (b) apontar os motivos para a realização do estudo; (c) mencionar a audiência, isto é, para quem os resultados do estudo são destinados; (d) definir se os resultados se destinam a ser utilizados em contextos comparativos. Na definição do escopo as informações devem ser descritas claramente, incluindo a unidade funcional (responsável por proporcionar uma referência para a qual os dados de entrada e de saída são normalizados), e a fronteira do sistema (determina quais processos devem ser incluídos na avaliação).

**Figura 5-** Quadro de Avaliação de Ciclo de Vida

**Fonte:** De Souza, 2016 (adaptado da ISO 14040:2006)

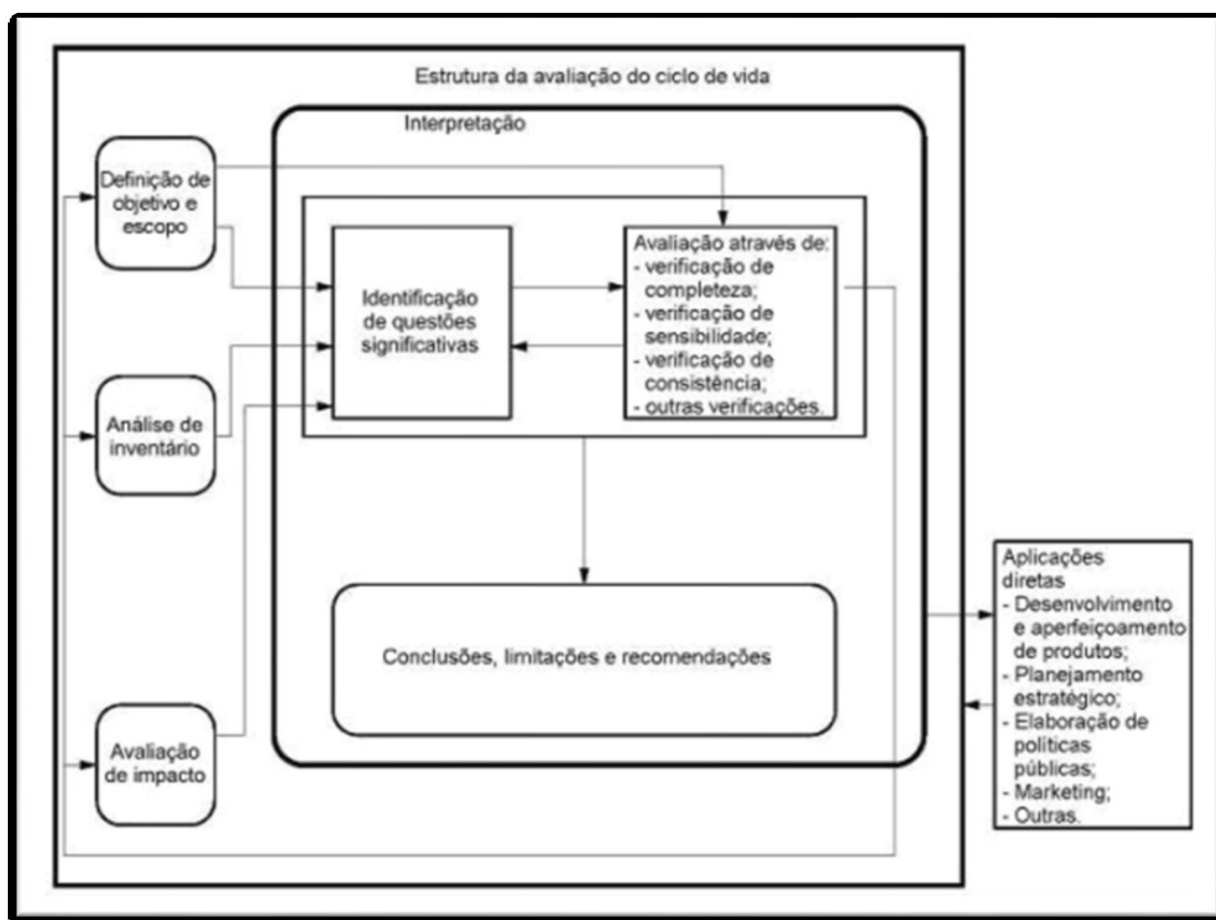
Assim, garante-se que o alcance, a profundidade e os detalhes do estudo sejam compatíveis e suficientes para alcançar o objetivo (DE SOUZA, 2016; DE SOUZA et al., 2019). Para Zhang et al. (2015), a avaliação do ciclo de vida é uma abordagem abrangente para quantificar e avaliar o consumo de recursos e os impactos ambientais associados a um produto (ou serviço) ao longo de seu ciclo de vida. Existem quatro fases na avaliação do ciclo de vida (Figura 6): a) definição do objetivo e âmbito do estudo, b) construir um inventário do ciclo de vida (ICV - LCI - *Life Cycle Inventory*), c) impacto do ciclo de vida avaliação (AICV – LCIA - *Life Cycle Inventory Assessment*), d) interpretação.

A construção do inventário do ciclo de vida é a fase mais importante porque nesta fase todas as atividades envolvidas no ciclo de vida do produto precisam ser analisadas e modeladas, além de todos os dados relativos ao ambiente tendo seus impactos compilados e calculados. Os resultados de LCI são a base para a avaliação de impacto do ciclo de vida (ZHANG et al., 2015). Em alguns casos o objetivo e o escopo do estudo podem ser revistos devido a limitações 20 imprevistas, restrições, ou devido a informações adicionais.



Tais modificações, juntamente com a sua justificativa, devem ser documentadas. Durante a realização da etapa de inventário, os dados qualitativos e quantitativos devem ser recolhidos de cada unidade de processo dentro dos limites do sistema. Os dados recolhidos (quer sejam medidos, calculados ou estimados) (Figura 6), são utilizados para quantificar as entradas e saídas de uma unidade de processo.

**Figura 6-** Estrutura da ACV



Fonte: ISO 14040, 2006

### 2.2.6 Avaliação dos impactos do ciclo de vida nos processos

A indústria metalúrgica é conhecida por ter um significativo impacto sobre o meio ambiente, devido ao uso intensivo de energia e matérias-primas. Por isso, a minimização de danos ambientais resultantes de tais operações como a fundição

torna-se uma necessidade (LIU; SYBERFELDT, 2022). A ACV é uma ferramenta apropriada para analisar o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida de desenvolvimento de um produto (LIU; SYBERFELDT, 2022).

Nas últimas décadas, regulamentos ambientais têm compelido o setor manufatureiro a tomar medidas que ajudem a reduzir impacto ambiental (BOCKEN et al., 2014). A integração de práticas de sustentabilidade é obrigatória para reduzir tanto o desperdício quanto emissões, tais como gases de efeito estufa inerentes aos processos de fabricação (AHMADI-GH; BELLO-PINTADO, 2022; KURDVE et al., 2015; DARMAWAN et al., 2014).

A ACV pode ajudar na tomada de decisões no contexto do desenvolvimento sustentável, uma vez que observa os possíveis efeitos ambientais associados às diversas fases do ciclo de vida de um produto, incluindo a aquisição de matéria-prima, processo de fabricação, utilização, reciclagem e descarte final (HELMERS et al., 2020; TRAVERSO et al., 2012; ISO, 2006).

Cada estágio do ciclo de vida de um produto tem interações específicas com o meio ambiente, envolvendo a utilização de recursos naturais e a emissão de poluentes. A ACV apresenta um método quantitativo com o objetivo de elucidar interações e seus potenciais impactos ambientais (MÜLLER et al., 2020), constituindo-se como uma ferramenta adequada para identificar oportunidades de aprimoramento (ROY et al., 2019). A disponibilidade de métodos e ferramentas de software voltados à ACV oferece subsídios para a tomada de decisões visando a redução de impactos ambientais, tornando essencial a adoção desta abordagem no âmbito do setor de manufatura (GUMUS et al., 2016).

Para Azapagic et al. (2006), o campo de aplicação da avaliação do ciclo de vida em processos, sobretudo na modelagem e otimização, mostra que o principal problema encontrado na área ainda está em encontrar as melhores estratégias e escolher a melhor alternativa em um ambiente de decisão com objetivos variados e, muitas vezes, conflitantes. Jacquemin et al. (2012) reconheceram que a avaliação de ciclo de vida é promissora nas fases iniciais para utilização em processos.

Além disso, a variedade de métodos e ferramentas de software disponíveis podem mitigar conflitos, tornando a ACV amplamente aplicável em diferentes setores produtivos da indústria de manufatura (RAOUFI et al., 2019). Na realização da avaliação de ciclo de vida de processos de fabricação se faz necessária a

realização de modelagem das operações inseridas no processo, com o objetivo de efetuar a previsão do desempenho para alcançar máxima produtividade e qualidade, e reduzir os custos (VAN LUTTERVELT et al., 1998).

No entanto, a modelagem do ACV está condicionada a critérios de otimização com finalidades diferentes para determinadas funções, o que muitas vezes significa que a melhora de um fator dentro de um processo pode resultar na piora de outros fatores, ou seja, objetivos conflitantes (ZANUTO, 2016; ZANUTO et al., 2019).

Como forma de auxílio, softwares proporcionam aos estudos de ACV a otimização do tempo para a realização de cálculos, permitindo comparar ciclos de vida de produtos, analisar o fluxo de materiais e energia, analisar impactos ambientais, bem como a possibilidade de apresentar os resultados na forma de gráficos, fluxogramas e tabelas, facilitando, assim, a interpretação das informações por parte do usuário (CAMPOLINA et al., 2015). Dentre esses softwares se destacam:

- **Sima Pro 7:** Desenvolvido por Pré Consultants. Possui vários métodos de avaliação de impacto (CML 1992, Eco-indicator 99, EPS2000, entre outros) e banco de dados (BUWAL 250, Ecoivent, IVAM LCA Data, entre outros) que podem ser editados e ampliados sem limitação. Com ele pode-se comparar e analisar ciclos de vida de produtos que possuem diferentes componentes em sua composição como, por exemplo, o ciclo de vida de equipamentos elétricos e eletrônicos. O software Sima Pro é o mais utilizado para a análise ambiental dos produtos visando a tomada de decisão considerando-se o desenvolvimento de produtos e política dos mesmos (CAMPOLINA et al., 2015).
- **GREET Model:** Desenvolvido pelo “The U.S. Department of Energy’s Office of Transportation Technologies fuel-cycle model called GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation)”. Ele pode ser usado para avaliar diferentes combinações de motores e combustíveis.
- **IDEMAT 2005:** Elaborado pela Delft University of Technology (na Holanda). É utilizado para a seleção de materiais no processo de projeto, fornecendo um banco de dados com informações técnicas sobre materiais, processos e componentes, permitindo, assim, a comparação de informações.

- **KCL-ECO 4.0:** Utilizado para aplicar a ACV em estudos que possuem sistemas com muitos fluxos de processos incluindo recursos gráficos, procedimentos de alocação e avaliação de impacto (caracterização, normalização e ponderação).
- **OpenLCA:** Desenvolvido pela GreenDelta GmbH, o OpenLCA é o único software profissional em gestão de informação de ciclo de vida no mundo totalmente gratuito, sem custos de licenças e open source. A condição de código aberto proporciona várias facilidades para os usuários do OpenLCA, como custo reduzido na sua aquisição e a possibilidade de personalização do software de acordo com demandas e preferências específicas (OPENLCA, 2020). Estes fatores foram determinantes para que o OpenLCA fosse escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa.

Durante a avaliação de ciclo de vida, se faz necessária também a utilização de métodos de caracterização para a realização da avaliação do impacto do ciclo de vida, como, por exemplo, o CML. Este método é objeto de estudos por diversos pesquisadores e grupo científicos (GABI, 2010).

### 2.2.7 Método CML

Durante a análise do ciclo de vida, é imperativo empregar métodos de caracterização para conduzir a avaliação do impacto do ciclo de vida, como o método CML (ZANUTO, 2016; ZANUTO et al., 2019; GUINÉE et al., 2001). O método CML é uma abordagem que engloba diversas categorias de impacto ambiental, as quais são expressas em termos de emissões para o meio ambiente. Seus modelos de caracterização foram meticulosamente selecionados por meio de uma revisão abrangente das metodologias existentes (RENOU et al., 2008).

O método CML (centro de estudos de matéria e energia), desenvolvido na Universidade de Leiden, e é um dos métodos mais utilizados para calcular os impactos ambientais em ACV. Ele se baseia numa série de categorias de impacto, como por exemplo as emissões de gases de efeito estufa, o uso de recursos naturais, a poluição do ar e da água, etc. (RENOU et al., 2008)

A maior vantagem do método CML é a sua abordagem abrangente. Isso permite que você analise os impactos ambientais em várias categorias com grande

detalhe. Dá a organização um quadro abrangente de desempenho ambiental de um produto ou processo e permite-lhe priorizar intervenções de mitigação em áreas críticas. Além disso, o método CML é suficientemente flexível para que possa ser aplicado a uma gama de produtos ou seja é uma ferramenta versátil para a ACV (ZANUTO, 2016).

No entanto, é importante destacar que a ACV e o método CML têm suas limitações. A precisão dos resultados depende da qualidade dos dados de entrada e das suposições feitas durante a análise. Além disso, a ACV não leva em consideração todas as questões sociais e econômicas associadas a um produto ou processo, focando principalmente nos impactos ambientais.

Em resumo, a análise do impacto do ciclo de vida com método CML é uma ferramenta adequada para revisões e para melhorar o desempenho ambiental de produtos e processos. No entanto, deve ser utilizada juntamente com outras abordagens e ter em consideração aspectos sociais e econômicos para uma tomada de decisão verdadeiramente sustentável. Ao passo que o conhecimento da sustentabilidade continua a crescer, o ACV e métodos como o CML vai desempenhar um papel cada vez mais vital na busca por um mundo mais sustentável.

Esse método possui uma série de categorias de impactos ambientais, expressas por meio de termos de emissões para o ambiente. É um método que se baseia na abordagem *midpoint*, em que os indicadores são definidos entre a emissão e o *endpoint* que, por sua vez, utiliza indicadores no nível das áreas de proteção (POTTING; FINNVEDEN, 2015). Seus modelos de caracterização foram selecionados mediante uma extensa revisão das metodologias existentes. Nele são abordadas as seguintes categorias de impacto: esgotamento de recursos abióticos, uso da terra, mudança climática, esgotamento de ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização (MENDES et al., 2015).

A avaliação de impacto do ciclo de vida geralmente envolve uma quantidade elevada de emissões e recursos consumidos resultantes do ICV (Inventário do Ciclo de Vida), e a interpretação desta lista é um processo difícil. Assim, os métodos de AICV são elaborados para auxiliar esta interpretação. Na Figura 7 são descritos

alguns métodos que podem ser aplicados na fase de AICV, sendo que cada um deles apresentam características próprias (LUZ, 2017).

**Figura 7-** Principais categorias de impactos e modelos de caracterização para ACV

MÉTODOS DE AICV (MODELOS DE CARACTERIZAÇÃO)	MÉTODOS DE AICV (MODELOS DE CARACTERIZAÇÃO)											
	Mudança Climática	Depleção da Camada de Ozônio	Efeitos Respiratórios (Inorgânicos)	Toxicidade Humana	Radiação Iônica	Ecotoxicidade	Formação de Ozônio Troposférico	Acidificação	Eutrofização Terrestre	Eutrofização Aquática	Ocupação/Use de Terra	Consumo de recursos abióticos
CED												X
CML2002	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eco-Indicator 99	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X
EDIP2003 / EDIP976	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
EPS 2000	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Impact 2002+	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
IPCC	X											
LIME	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
LUCAS	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X
MEEuP	X	X	X	X		X	X	X	X			X
ReCiPe	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Swiss Ecoscarcity 07 X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TRACI	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X

Fonte: Luz, 2017.

Após a escolha do método e a avaliação do impacto, a fase de interpretação auxilia para tomadas de decisão, obtendo-se uma melhor compreensão das incertezas e suposições relacionadas ao estudo (ZHOU et al., 2011). Zhou et al. (2011) reforçam que a fase de interpretação é muito importante para tornar os resultados da avaliação de impacto comparável e compreensível, para, então, poderem ser utilizados no processo de tomada de decisão.

Contudo, a fase de interpretação não se refere apenas aos resultados da fase de avaliação de impacto. Curran (2013) menciona que a interpretação inclui a comparação dos dados e resultados encontrados anteriormente no estudo para colocá-los no contexto adequado para a tomada de decisão considerando as suas limitações. Matthews et al. (2015) apontam que a fase de interpretação se refere a estudar os resultados do objetivo e escopo, análise de inventário e avaliação de

impacto, com o objetivo de tirar conclusões e recomendações que podem ser relatadas. Deste modo, a interpretação é um processo iterativo com as outras três fases da ACV.

### 2.2.8 Método RECIPE

RECIPE é um método altamente reconhecido e muito usado para análise de ciclo de vida (ACV). Foi concebido para avaliar como os produtos, processos ou sistemas afetam a natureza durante todo o curso da sua existência. Esta também é a explicação por trás de seu nome: “RECIPE” vem da abreviação em inglês de recurso para avaliação de impacto de ciclo de vida, ou ReCiPe (*Resource for Assessment of Life Cycle Impact*) (ZHANG et al., 2023).

O método RECIPE é um método valioso para avaliar os efeitos ambientais em várias categorias (tais como recursos naturais - água e energia), ecossistemas (biodiversidade humana), saúde humana e qualidade do ar ou da água (GARCIA et al., 2023). Este método aspira a dar uma perspectiva abrangente dos efeitos ambientais, tomando diversas medidas de impacto e fatores pertinentes à caracterização de cada um desses pontos (REPORT RECIPE, 2016).

O método RECIPE é baseado em uma abordagem de caracterização de impacto, em que os impactos ambientais são associados a categorias específicas, como o aquecimento global, a acidificação do solo ou a depleção de recursos (LEE et al., 2023). Essa caracterização permite que os resultados da ACV sejam expressos de maneira mais compreensível e comparável (REPORT RECIPE, 2016). Os principais passos do método RECIPE incluem:

- **Definição de objetivo e escopo:**

Nesse estágio, os objetivos da análise de ciclo de vida são estabelecidos, juntamente com os limites do sistema a ser avaliado, conforme o Quadro 3.

**Quadro 3-** Categorias de impacto método RECIPE

<b>Impactos</b>
Formação de partículas finas
Escassez de recursos fósseis
Ecotoxicidade de água doce
Eutrofização de água doce
Aquecimento global
Toxicidade cancerígena humana
Toxicidade não cancerígena humana
Radiações ionizantes
Uso da terra
Ecotoxicidade marinha
Eutrofização marinha
Escassez de recursos minerais
Formação de ozônio, saúde humana
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres
Depleção do ozônio estratosférico
Acidificação terrestre
Ecotoxicidade terrestre
Consumo de água

**Fonte:** Autor, 2024.

- **Inventário do ciclo de vida:**

É a coleta de dados detalhados sobre todas as entradas e saídas do sistema, incluindo matérias-primas, energia, emissões e resíduos, ao longo de seu ciclo de vida (WANG et al., 2023).

**Avaliação do impacto:** Nesta etapa, os dados do inventário são traduzidos em impactos ambientais específicos, usando uma série de fatores de caracterização. Isso envolve o cálculo de indicadores ambientais, como emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes ou potencial de acidificação;

**Normalização e agregação:** Os indicadores de impacto são normalizados e agregados em categorias mais amplas, como aquecimento global ou toxicidade aquática, para simplificar a interpretação;



Interpretação: Os resultados são interpretados à luz dos objetivos e do escopo definidos no início da análise. Isso pode envolver a identificação de áreas de maior impacto e a busca por oportunidades de melhoria.

Uma das vantagens do método RECIPE é sua abordagem aberta e transparente, que permite aos analistas escolherem os indicadores de impacto que são mais relevantes para seu contexto específico. Além disso, o método é frequentemente atualizado para incorporar os avanços na compreensão científica dos impactos ambientais (WANG et al., 2023).

O método RECIPE desempenha um papel fundamental na avaliação de como produtos, processos ou sistemas afetam o meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida. Ele fornece uma estrutura sólida para a tomada de decisões sustentáveis, ajudando a identificar áreas de foco para a redução de impactos ambientais e a promoção da sustentabilidade (REPORT RECIPE, 2016).

### **2.2.9 Quantificação de informações do processo de fundição no LCA**

A quantificação de informações desempenha um papel fundamental no ciclo de vida do produto (TAYLOR et al., 2023). Para a análise de ciclo de vida do processo de fundição não é diferente. Para garantir eficiência, qualidade e sustentabilidade nesse processo, é essencial que as informações sejam quantificadas e gerenciadas de maneira adequada em todas as etapas.

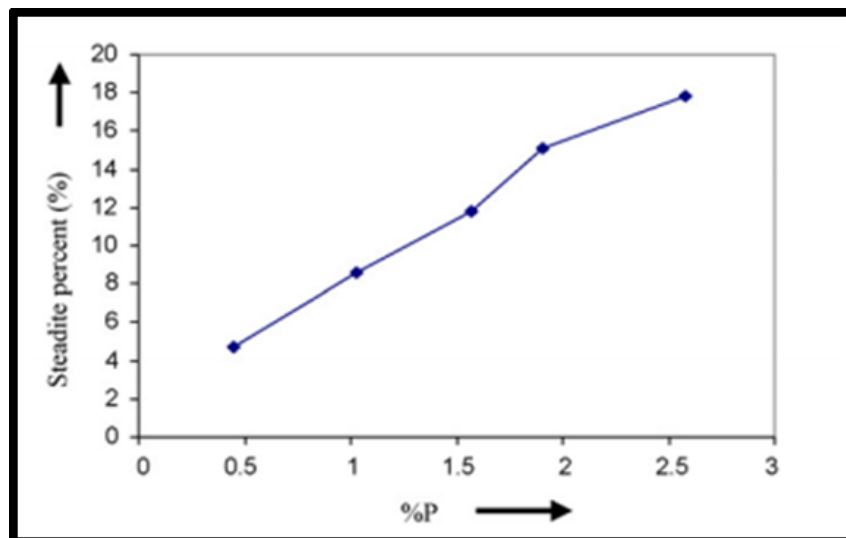
## **2.3 FERRO FUNDIDO**

Os ferros fundidos representam ligas de ferro-carbono-silício (Fe-C-Si), incluindo ainda manganês, enxofre e fósforo (Mn, S e P), podendo conter outros elementos. Sua classificação em diferentes famílias baseia-se principalmente na configuração da grafita. Por vezes, o nome de cada família reflete a forma da grafita (nodular, vermicular), enquanto outras vezes está relacionado à aparência da fratura (cinzento, branco), e sua maleabilidade está associada às propriedades mecânicas.

Conforme Chiaverini (1988) observou, a composição química é um dos fatores cruciais na determinação da microestrutura dos ferros fundidos. Abaixo são apresentados os elementos de liga e seus respectivos efeitos.

- Carbono: é o elemento mais importante em ferros fundidos. É o maior responsável pelas propriedades mecânicas e de fundição. Elemento base que determina a quantidade de grafita a se formar (CHIAVERINI, 1988).
- Silício: é um elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carboneto de ferro. Sua presença, independentemente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o cinzento ou branco.
- Fósforo: raramente é adicionado intencionalmente, mas tende a estar presente no ferro gusa ou a sucata utilizada. Até certo ponto aumenta a fluidez do ferro. Forma uma fase de fosfeto com baixo ponto de fusão no ferro fundido cinzento, comumente denominada como steadita. Segundo Abbasi et al. (2007), aumentando o percentual de fósforo de 0,45% para 2,58% em peso, a quantidade de steadita aumenta de 4,7% para 17,81% no ferro fundido cinzento, como pode ser observado na Figura 8.

**Figura 8-** Efeito do fósforo (%) na formação de steadita no ferro fundido cinzento.



Fonte: Abbasi et al., 2007.

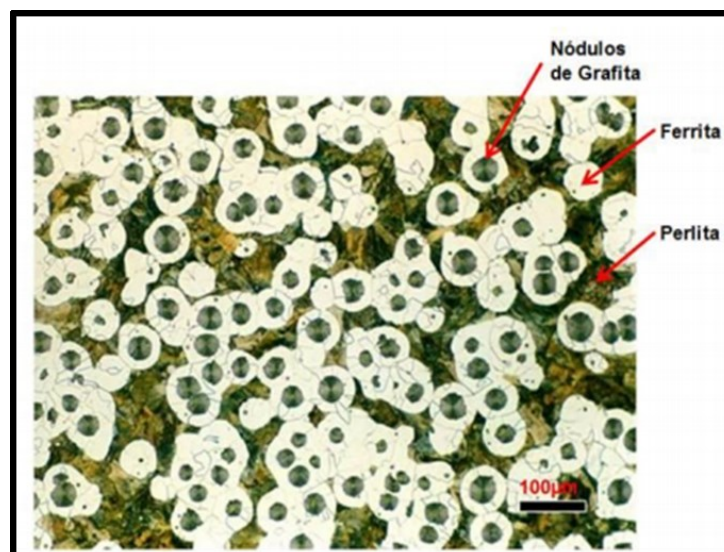
Em níveis elevados, o fósforo desempenha um papel na redução da porosidade, enquanto em níveis muito baixos, pode aumentar a penetração do metal no molde. Como resultado, a maioria das peças é fabricada com teores de fósforo variando de 0,02% a 0,10%. Em peças fundidas que requerem resistência à tração, pode ser necessário encontrar os níveis ideais de fósforo para sua aplicação (ASM HANDBOOK, 1992).

O enxofre desempenha um papel crucial na nucleação da grafita, bem como no crescimento das células eutéticas e na profundidade do coquilhamento no ferro fundido. Por outro lado, o manganês tem efeitos opostos ao enxofre na nucleação da grafita e, conseqüentemente, no número de células eutéticas. Ele forma o sulfeto de manganês (MnS), que atua como núcleo para a grafita e previne a presença de enxofre livre no líquido, diminuindo a velocidade de crescimento das células eutéticas.

Portanto, é crucial manter um equilíbrio nos teores de manganês e enxofre. A matriz metálica dos ferros fundidos pode consistir em ferrita, proporcionando baixa resistência mecânica associada à alta ductilidade e tenacidade. Por outro lado, uma matriz formada por perlita resulta em bons valores de resistência mecânica, com ductilidade relativamente baixa.

Quando se encontram misturas de ferrita e perlita, várias categorias de ferro fundido são produzidas, exibindo uma variedade de propriedades que se adaptam a diferentes aplicações específicas (GUESSER, 2009). A Figura 9 ilustra a matriz de um ferro fundido nodular, apresentando perlita na área escura da microestrutura e ferrita circundando os nódulos de grafita na região mais clara (RADZIKOWSKA, 2005).

**Figura 9-** Matriz ferrita-perlita em ferro fundido nodular



Fonte: Radzikowska, 2005

### 2.3.1 Tipos de ferro fundido

Chiaverini (1988) e De Oliveira (2015) apresentam os seguintes tipos de ferro fundido:

- **Ferro fundido cinzento:** Tem cor escura, sendo rico em carbono e silício. Na sua estrutura, parte do carbono está livre (parecendo grafita em lâminas), e outra parte está combinada (chamada de cementita -  $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- **Ferro fundido branco:** Tem cor clara, e também possui carbono e silício. Entretanto, devido às condições de fabricação e menos silício, todo o carbono está combinado ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- **Ferro fundido mesclado:** É uma mistura de ferro fundido branco e cinzento em diferentes proporções.
- **Ferro fundido maleável:** É feito a partir do ferro fundido branco, passando por um tratamento térmico especial (chamado maleabilização), que transforma a maior parte do carbono combinado em grafita em forma de nódulos.
- **Ferro fundido nodular:** Depois de um tratamento no estado líquido, possui carbono livre em forma de grafita esférica, o que o torna mais dúctil. É por isso que às vezes é chamado de ferro fundido dúctil.
- **Ferro fundido de grafita compactada (vermicular – CGI *compacted graphite iron*):** Aqui a grafita ocorre em “escamas”, ou seja, como plaquetas ou estrias. Este tipo de ferro fundido requer a adição de elementos especiais, como terras raras, e um elemento adicional, como titânio, para reduzir a formação de grafita esférica. Ele combina a fundibilidade do ferro fundido cinzento com uma resistência mecânica melhorada e alguma ductilidade.

### 2.3.2 Fatores preponderantes na determinação da estrutura do ferro fundido

Chiaverini (1988) e Prijanovic et al. (2023) destacam que a estrutura química do ferro fundido é amplamente influenciada por carbono e silício. Enquanto o

carbono regula a formação da grafita, o silício atua como um agente grafitizante, promovendo a decomposição do carboneto de ferro.

A presença de silício, independentemente do teor de carbono, pode direcionar o ferro fundido para a condição cinzenta ou branca. Contrariamente, o manganês, sempre presente, exerce um efeito oposto ao silício, estabilizando a cementita e equilibrando sua influência grafitizante.

De maneira precisa, o manganês, tanto em ferro fundido quanto em aços, é adicionado como dessulfurante. Contudo, devido ao usual excesso de manganês, este funciona como estabilizador da perlita, resultando em uma estrutura predominantemente perlítica, especialmente em peças volumosas. Outros elementos, como fósforo e enxofre, e impurezas comuns, não desempenham um papel significativo na promoção da grafitização. Apenas o fósforo apresenta uma estabilização relativamente forte do carboneto de ferro, podendo ocasionar a formação de carboneto de ferro e fosfeto de ferro, resultando em uma aparência branca e porosa (DE OLIVEIRA, 2015).

### **2.3.3 Solidificação do ferro fundido**

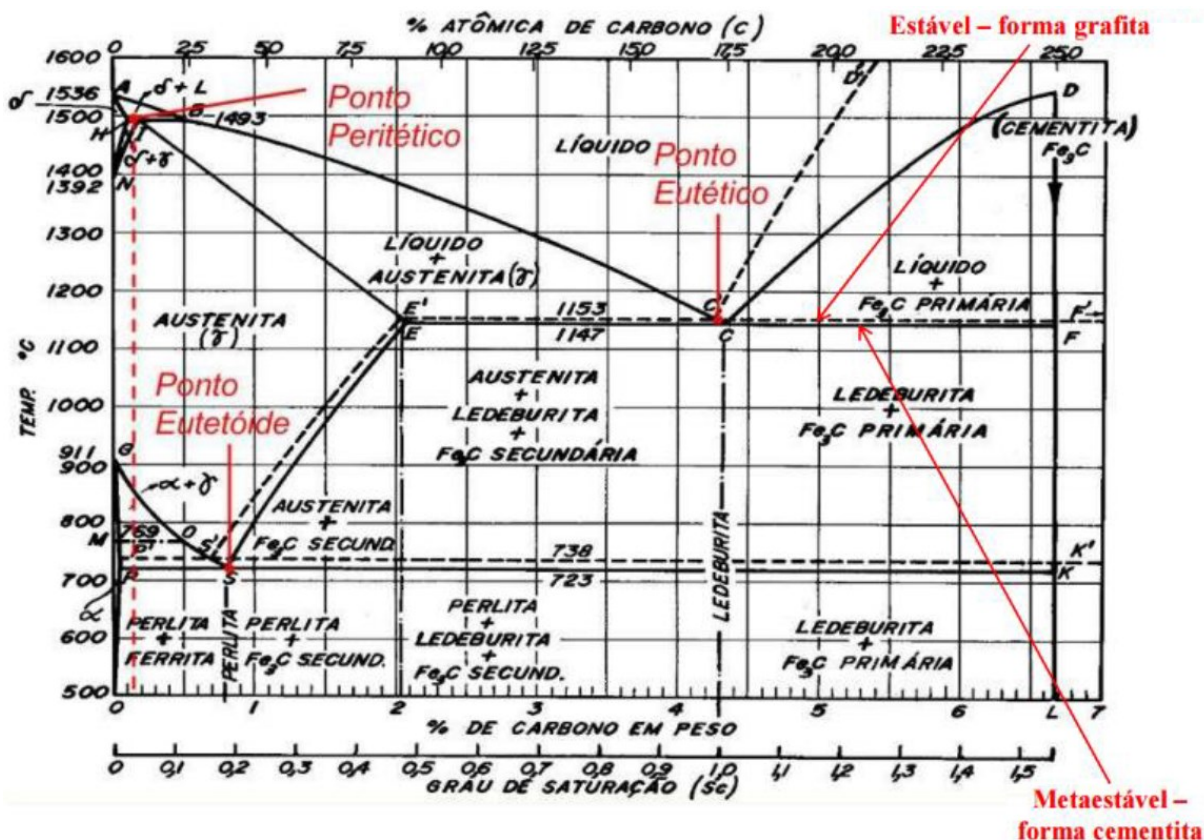
O estudo da metalurgia dos ferros fundidos é primordial para o entendimento da formação da microestrutura e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas do material (SPINOLA; SPINELLI, 2016). A Figura 10 mostra o diagrama de equilíbrio ferro-carbono metaestável e estável superpostos, sendo representado por linhas pontilhadas em que o diagrama estável difere do metaestável.

A solidificação dos ferros fundidos cinzentos é um fenômeno complexo que segue um processo de nucleação e crescimento envolvendo múltiplas fases, incluindo austenita ( $\gamma$ ), grafita e cementita. Durante este processo, ocorre uma competição na solidificação do eutético entre a formação de austenita e grafita (eutético estável) ou austenita e carboneto (eutético metaestável). Em outras palavras, a solidificação pode ocorrer de forma estável com a coexistência de austenita e grafita, ou de forma metaestável com a presença de austenita e cementita (PIESKE et al., 1980).

A Figura 11 ilustra os diagramas estável e metaestável sobrepostos, mostrando que, abaixo da temperatura do eutético estável, pode ocorrer a formação

de grafita e austenita, caracterizando-se a constituição de ferro fundido cinzento. Por outro lado, abaixo da temperatura do eutético metaestável, pode ocorrer a formação de cementita e austenita (constituindo a ledeburita), fenômeno característico na produção de ferro fundido branco.

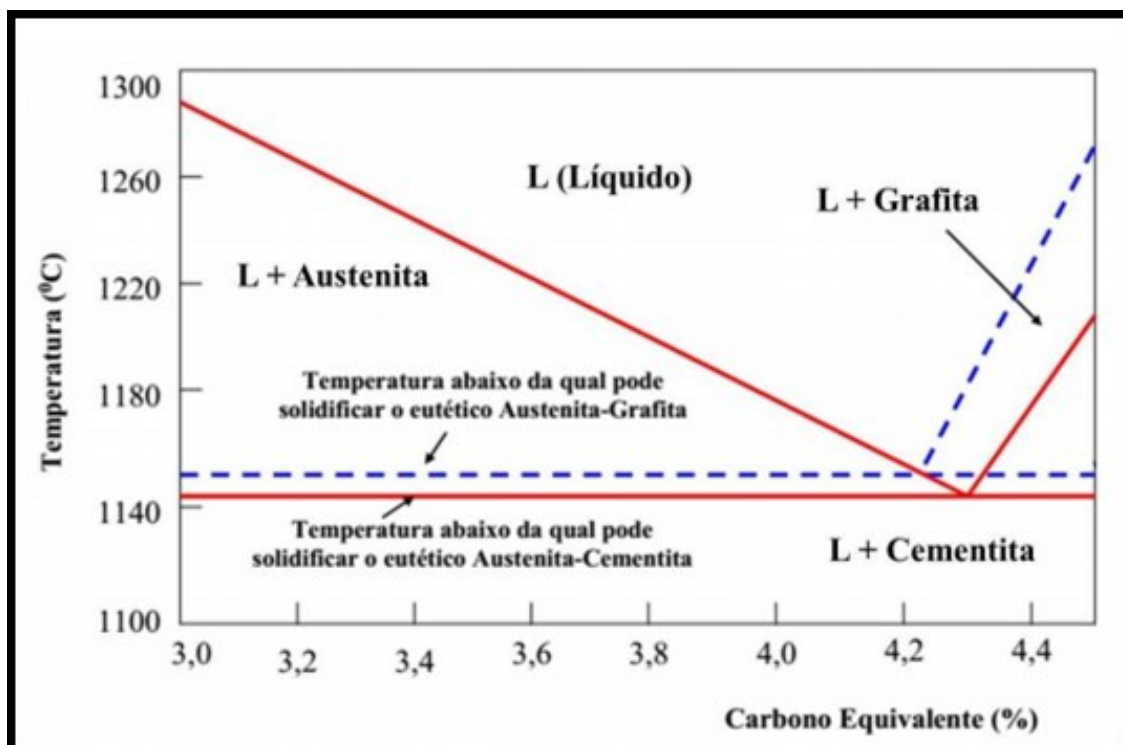
**Figura 10-** Diagrama de equilíbrio ferro-carbono



Fonte: De Oliveira, 2017.

A composição química exerce uma influência significativa sobre o tipo de eutético que se forma durante o processo de solidificação. Certos elementos tendem a favorecer a formação de uma matriz ferrítica, como o silício, que aumenta a distância entre as temperaturas eutetoides estáveis e metaestáveis, estimulando a reação eutetoide estável. Por outro lado, outros elementos favorecem a presença de uma matriz perlítica, geralmente dificultando a reação eutetoide estável. Isso pode ser atribuído à interferência desses elementos na deposição de carbono sobre a grafita, como é o caso do estanho e do cobre, ou à redução da diferença entre as temperaturas eutetoides estáveis e metaestáveis, como ocorre com o manganês, o cromo e o vanádio.

**Figura 11-** Diagrama ferro-carbono (estável e metaestável) para ferros fundidos.



Fonte: Pieske et al., 1980.

Ao analisar a solidificação de ferro fundido a partir do estado líquido dentro de um molde, observa-se uma mudança na inclinação ou mesmo um patamar na curva de resfriamento, indicando o momento em que ocorre a nucleação e o crescimento de uma fase sólida. Teoricamente, a temperatura em que essa formação de fase ocorre corresponde à ultrapassagem de uma linha no diagrama de equilíbrio. No entanto, em condições reais, essa inflexão ocorre ligeiramente abaixo da temperatura teórica, e a transformação ocorre com super-resfriamento. A solidificação é um processo termicamente ativado que requer super-resfriamento em relação à temperatura de equilíbrio para que os primeiros núcleos comecem a se formar.

Para produzir ferro fundido cinzento, é necessário que a solidificação ocorra pelo sistema eutético estável, permitindo a nucleação e o crescimento da grafita. Isso requer que o super-resfriamento do líquido eutético esteja em temperaturas superiores ao início da formação do eutético metaestável, evitando a formação de carbonetos. Na produção industrial de ferro fundido branco, é essencial combinar esses dois fatores (INFOMET, 2024). O processo de "coquilhamento" é empregado

para isso, envolvendo o despejo do metal líquido em moldes metálicos, em que o resfriamento ocorre rapidamente, eliminando praticamente toda a grafitização e retendo o carbono na forma combinada (INFOMET, 2024).

A profundidade da camada coquilhada, que é a seção das peças em contato com a parede metálica do molde, pode ser controlada ajustando-se o teor de silício do ferro fundido. No entanto, além do silício, outros fatores influenciam, como a temperatura de vazamento e do molde metálico, a espessura da peça na seção coquilhada e o tempo de contato do metal com a coquilha.

O manganês e o enxofre, quando considerados em conjunto, são elementos estabilizadores do carboneto. O manganês neutraliza os efeitos prejudiciais do enxofre quando seu teor é pelo menos duas vezes maior, acrescido de 0,30%. Para que o manganês atue como estabilizador do carboneto, é necessário que seu teor seja suficiente para que o enxofre se combine totalmente com ele; caso contrário, seu efeito é contraproducente, diminuindo a profundidade de coquilhamento. Além disso, o manganês tem o efeito de aumentar a profundidade de coquilhamento cerca de quatro vezes mais rapidamente que o cromo. Quanto ao fósforo, sua presença tende a reduzir a profundidade de coquilhamento, sendo mantido abaixo de 0,4% nos ferros fundidos brancos (PRIJANOVIC et al., 2023).

#### **2.3.4 Fundição e o processo de inoculação do ferro fundido**

Como já abordado até aqui a fundição é um processo crucial na fabricação de peças metálicas, permitindo a produção em larga escala de componentes com formas complexas. Dentro desse contexto, a inoculação é uma etapa fundamental que visa melhorar as propriedades do metal fundido, tornando-o mais resistente e maleável (PRIJANOVIC et al., 2023).

Na fundição, o metal é aquecido a altas temperaturas até atingir o estado líquido, sendo então despejado em moldes que definem a forma da peça a ser produzida. Esse metal líquido, no entanto, está sujeito a diversas impurezas e defeitos que podem comprometer a qualidade do produto final.

É aí que entra a inoculação. Esse processo consiste na adição controlada de agentes inoculantes, como o ferro silício ou o ferro magnésio, ao metal fundido (GUZIK et al., 2023).

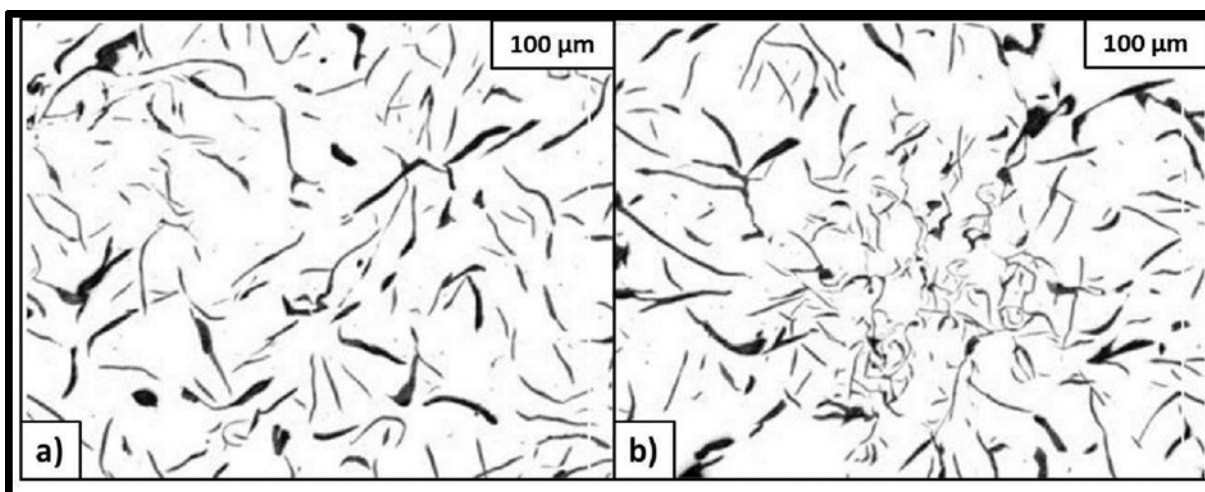


A inoculação dos ferros fundidos é definida como a introdução de elementos no banho de metal fundido para suprimir ou diminuir o fenômeno de super-resfriamento pelo menos temporariamente. Estes elementos fazem o papel de núcleos exógenos de cristalização (FRANZEN et al., 2020). A inoculação tem se tornado uma das operações metalúrgicas mais importantes na produção de fundidos com qualidade.

Em linhas gerais, a inoculação refere-se à introdução de ligas à base de silício durante o processo de solidificação, com o propósito de promover a formação de grafita, aumentar o número de células eutéticas e reduzir o tamanho das dendritas de austenita (AVDUSINOVIC et al., 2015). As curvas de análise térmica são empregadas para registrar a evolução da temperatura ao longo do tempo durante a solidificação.

Observa-se que a inoculação reduz o super-resfriamento, minimizando o risco de o líquido atingir temperaturas inferiores à temperatura eutética metaestável, onde a cementita poderia se formar. Este processo afeta diretamente as propriedades mecânicas dos ferros fundidos, impedindo a formação de grafita de super-resfriamento, que está associada a uma matriz ferrítica de baixa resistência. A inoculação também promove a formação de grafita tipo A e previne a formação de grafita de super-resfriamento (tipo D), aumentando a taxa de crescimento das células eutéticas. A Figura 12 ilustra as mudanças na microestrutura do ferro fundido cinzento induzidas pela inoculação.

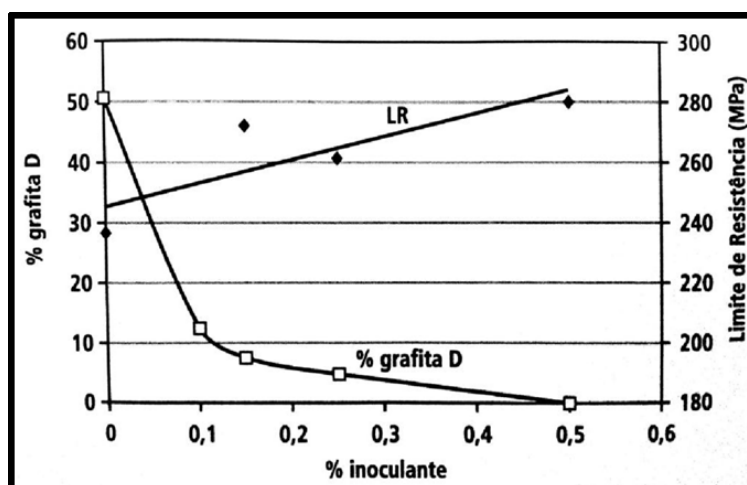
**Figura 12-** (a) Grafita tipo A em ferro fundido cinzento inoculado; (b) grafita tipo D em amostra não inoculada.



Fonte: Frás e Górný, 2012.

É importante ressaltar que a inoculação desempenha um papel crucial na produção de grafita tipo A, evitando a formação de grafita de super-resfriamento e a presença de carbonetos na matriz do ferro fundido cinzento. Além disso, a adição de inoculantes é altamente eficaz para aumentar a quantidade de células eutéticas. Em suma, a inoculação resulta no aumento da quantidade de células eutéticas, o que contribui para a obtenção de propriedades físicas e mecânicas superiores (MARTIN, 2015), como evidenciado na Figura 13.

**Figura 13-** Efeito de inoculação no limite de resistência



Fonte: Guessier, 2009.

Os inoculantes apresentam seu melhor desempenho imediatamente após a sua adição (MARTIN, 2015). Já as partículas nucleantes têm a sua ação dependente do tempo que transcorre desde o momento de sua adição até a solidificação no molde. Com o aumento deste intervalo, a eficiência do inoculante diminui, sendo esta perda de eficiência denominada pela literatura inglesa como *fading* (AVDUSINOVIC et al., 2015).

### 2.3.5 Tipos de Inoculantes

O inoculante mais comumente empregado na metalurgia é o ferro-silício com uma composição de 75% a 80% de silício, sendo acrescido em quantidades entre 0,2% a 0,6%. Os resíduos de cálcio e alumínio presentes no ferro-silício habitualmente exercem um impacto considerável no processo de grafitação. Além do ferro-silício, outros inoculantes, geralmente reconhecidos por seus "nomes comerciais", estão disponíveis no mercado. A maioria destes é baseada em ferro-silício, e inclui, além de alumínio e cálcio, elementos como bário, zircônio e estrôncio, os quais demonstram eficácia tanto na inoculação de ferro fundido cinzento quanto de ferro fundido nodular. Existem também inoculantes à base de cálcio-silício, grafita ou carbonetos.

Além do seu efeito grafitizante, alguns inoculantes podem conter elementos de liga, tais como cromo, molibdênio, níquel, entre outros, que desempenham papéis como perlitizantes (MARTIN, 2015). A seguir, são fornecidos mais detalhes sobre o bário e o estrôncio como inoculantes:

- **Inoculantes à base de FeSi-Ba:**

Estes inoculantes demonstram eficácia na redução do super-resfriamento e na formação de grafita tipo A, mesmo em condições de fusão adversas. O efeito de *fading* (perda de eficiência do inoculante) é mais duradouro com o uso destes inoculantes em comparação com outros baseados em ferro-silício convencional (JEZIERSKI; BARTOCHA, 2007). A presença de bário, cálcio e silício, em conjunto com o enxofre presente no ferro fundido cinzento, proporciona uma notável resistência ao coquilhamento. A combinação de bário e cálcio, frequentemente encontrada nesse tipo de inoculante, amplia a faixa de temperatura de atuação,

conduzindo a resultados melhores para peças com paredes finas ou com elementos fortemente coquilhantes.

- **Inoculantes à base de FeSi-Sr:**

Comercializados sob a marca registrada “*SuperSeed*” (Elkem), esses inoculantes são considerados potentes e são altamente eficazes na eliminação de carbonetos em ferros fundidos cinzentos. Elevadas concentrações de alumínio e cálcio reduzem significativamente a eficiência da inoculação para ligas contendo estrôncio. Por conseguinte, tais inoculantes devem conter, no máximo, 0,1% de cálcio e 0,5% de alumínio. O FeSi-Sr é particularmente eficaz na redução do coquilhamento em seções finas, superfícies e cantos, contribuindo para evitar fraturas causadas pela presença de carbonetos.

Uma característica distinta desses inoculantes é sua capacidade de produzir os efeitos desejados com quantidades menores adicionadas à liga, reduzindo assim a formação de escória resultante da oxidação de determinados elementos. Além disso, eles podem ser dissolvidos em temperaturas mais baixas. Outra vantagem é que a maioria dos inoculantes à base de FeSi possui altos teores de alumínio, o que minimiza o risco de defeitos na peça.

#### 2.3.5.1 *Nióbio e Ferro Fundido*

Os materiais metálicos desempenham um papel crucial na sociedade, abrangendo avanços tecnológicos e questões ambientais. O nióbio (Nb) é um metal singular, com relevância em diversas tecnologias e países emergentes. A extração do nióbio é feita a céu aberto, na maioria das vezes sem uso de explosivos, e predominantemente feita por escavadeiras. O nióbio é principalmente extraído do minério *columbita* e, posteriormente, ele passa por um processo de refinamento. O aumento do crescimento econômico tem gerado uma demanda cada vez maior por esse metal, destacando sua importância no cenário econômico mundial (BAKRY et al., 2023).

O nióbio é um elemento químico que tem despertado um crescente interesse na indústria de ferro fundido cinzento devido às suas propriedades únicas e vantagens significativas quando incorporado a esse material (DA SILVA, 2004). O ferro fundido cinzento é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações de

engenharia devido à sua excelente resistência à compressão e boa usinabilidade. A adição de nióbio a essa liga metálica proporciona uma série de benefícios notáveis:

- **Aumento da resistência mecânica:**

O nióbio é um fortalecedor das ligas metálicas, colaborando consideravelmente para a melhora da resistência mecânica do ferro fundido cinzento. Isso resulta em componentes mais robustos e duráveis, tornando-o adequado para aplicações com alta resistência, como peças de automóveis, motores, caixas de engrenagens e componentes industriais (DA SILVA, 2004);

- **Maior resistência à corrosão:**

A adição de nióbio melhora a resistência à corrosão do ferro fundido cinzento, sendo adequado para ambientes adversos em que a corrosão é uma preocupação. Isso é importante em aplicações ao ar livre ou em ambientes agressivos, como sistemas de tubulação e peças expostas à umidade;

- **Melhor usinabilidade:**

O nióbio ajuda na melhor usinabilidade do ferro fundido cinzento, facilitando o processo de fabricação. Isso resulta em redução de tempo e custos de produção, o que o faz uma escolha eficaz para peças que requerem usinagem precisa;

- **Redução do peso:**

O nióbio também permite a produção de componentes mais leves, o que é crucial em aplicações automotivas, aeroespaciais e outras em que o peso é um fator crítico. A baixa densidade do nióbio em comparação com outros elementos de liga contribui para essa redução de peso;

- **Melhoria na condutividade térmica:**

O nióbio também pode melhorar a condutividade térmica do ferro fundido cinzento. Isso é benéfico em aplicações que envolvem transferência de calor, como trocadores de calor e motores, em que uma alta eficiência na dissipação de calor é necessária (DA SILVA, 2004);

- **Sustentabilidade:**

A utilização de nióbio em ferro fundido cinzento pode contribuir para a sustentabilidade das operações industriais, pois a liga resultante geralmente possui uma vida útil mais longa e requer menos manutenção e substituição. Isso reduz o desperdício de material e a necessidade de recursos naturais.

A adição de nióbio ao ferro fundido cinzento oferece uma série de vantagens, incluindo maior resistência mecânica, melhor resistência à corrosão, maior usinabilidade, redução de peso, melhoria na condutividade térmica e benefícios em termos de sustentabilidade (DA SILVA, 2004). Isso torna essa combinação de materiais uma escolha atraente para uma variedade de aplicações industriais e automotivas, em que o desempenho e a durabilidade são fundamentais.

Segundo da Silva (2004), o nióbio (Nb) é um elemento metálico de número atômico 41 na tabela periódica dos elementos químicos. Sua massa específica é de  $8,57\text{g/cm}^3$  pouco superior à do ferro, e seu ponto de fusão é de  $2468\text{ }^\circ\text{C}$ . Possui baixa resistência à oxidação, e tem supercondutividade em temperaturas inferiores a  $-264\text{ }^\circ\text{C}$ . O perfil do consumo de nióbio distribui-se em: 75% na fabricação de aços microligados (sob a forma de ferro nióbio); 12% são utilizados na fabricação de aços inoxidáveis resistentes ao calor, também sob a forma de ferro nióbio; 10% na produção de superligas na forma de óxido de nióbio; e 3% para outros usos (também na forma de óxido de nióbio) (IBRAM, 2012).

A disponibilidade de nióbio no Brasil é grande, segundo o IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração) em 2012, o Brasil é o maior detentor de reservas mundiais e também é responsável por grande parte das exportações mundiais, O país responde atualmente por mais de 90% do volume do metal comercializado no planeta, seguido pelo Canadá e Austrália. No país, as reservas são da ordem de 842.460.000 toneladas e as maiores jazidas se encontram nos estados de Minas Gerais (75% do total), Amazonas (21%) e em Goiás (3%) (IBRAM, 2012).

Segundo relatório do Plano Nacional de Mineração 2030, o Brasil possui exploração em torno de 55 substâncias minerais, o que corresponde por mais de 4% da produção global. Além disso, é líder mundial apenas na produção do nióbio. Apesar da abundância de nióbio no Brasil, o preço está muito distante do valor do ouro. A liga ferro-nióbio foi comercializada em 2012 pelo preço médio de US\$

26.500,00 a tonelada. Já cotação média da onça do ouro (31,10 gramas) foi de US\$ 1.718,00. Atualmente cada quilo de nióbio custa entre 30 a 40 dólares (EXAME, 2023).

Um grande problema do nióbio, não é a escassez do elemento, mas sim a grande dificuldade de sua extração, que acarreta alto custo e, portanto, este é o seu maior problema operacional. Existem no mundo cerca de 85 minas do mineral espalhados pelos EUA, Rússia, Brasil e continente africano (MORF et al., 2013).

Por fim o nióbio, produzido em escala mundial tem seu maior uso na forma de liga ferro-nióbio, na produção de aços especiais e superligas, em que sua principal função é a de refinar, onde apenas 400 gramas de nióbio por tonelada tem o potencial de gerar aços mais leves e resistentes (BELÉM, 2019).

#### *2.3.5.2 Usinabilidade*

A usinabilidade de um material refere-se à facilidade ou dificuldade de usiná-lo, e está intimamente ligada ao desgaste da ferramenta de corte. Um material com elevada usinabilidade resulta em uma vida mais longa da ferramenta de corte (LEKAKH; RICHARDS, 2014).

Quando usinado, o ferro fundido cinzento forma cavacos de ruptura, enquanto os ferros fundidos maleáveis e nodulares formam cavacos longos. Os ferros fundidos são frequentemente considerados materiais de boa usinabilidade, sendo amplamente utilizados em diversos componentes (DE SOUSA et al., 2017). Comparativamente, a usinagem de ligas de ferro fundido cinzento é geralmente considerada mais fácil do que a usinagem de aços. Isso se deve à presença de grafita em forma de veios na microestrutura do ferro fundido cinzento, que atua como lubrificante e facilita a quebra do cavaco.

#### *2.3.5.3 Efeito da microestrutura na usinabilidade do ferro fundido*

A usinagem representa um segmento essencial no âmbito da manufatura, cuja condução eficiente é de suma importância para uma produção mais sustentável. A busca pela produção mais limpa está direcionada ao desenvolvimento de métodos e técnicas que visam otimizar a eficiência econômica e tecnológica,

mediante a redução do consumo de energia, recursos naturais e geração de resíduos, resultando, por conseguinte, na mitigação do impacto ambiental (VUKELIC et al., 2019).

Diversas características dos materiais exercem influência sobre sua usinabilidade, abarcando aspectos como dureza, resistência mecânica, ductilidade, taxa de resfriamento, condutividade térmica e estabilidade química (DE SOUSA et al., 2017). Tais propriedades, por sua vez, são influenciadas pela microestrutura do material, presença de partículas duras, inclusões e elementos que favorecem o coeficiente de atrito e a formação de cavaco, dentre outros fatores, os quais podem ser correlacionados à usinabilidade (DINIZ et al., 2003).

Conforme observado por Sudo et al. (2001), a microestrutura do ferro fundido constitui um dos principais determinantes de sua usinabilidade. O teor de ferrita e perlita na matriz, assim como a configuração, dimensão e distribuição da grafita e a presença de inclusões, guardam relação direta com parâmetros indicativos da usinabilidade do material, tais como a vida da ferramenta e a rugosidade da superfície usinada. O aumento do teor de perlita na matriz (e, conseqüentemente, a redução do teor de ferrita) implica no aumento da dureza e resistência mecânica, o que, por conseguinte, tende a diminuir a vida da ferramenta.

No caso do ferro fundido cinzento, o carbono está presente sob a forma de grafita em veios, os quais geralmente são frágeis, permitindo uma ruptura facilitada do cavaco durante a usinagem. Além disso, a grafita lamelar proporciona uma ação lubrificante na interface cavaco/ferramenta/peça. Embora a presença de grafita em veios seja um fator determinante na usinabilidade do material, tal característica está intrinsecamente ligada à matriz do material, a qual define sua dureza e resistência mecânica (DINIZ et al., 2003).

#### *2.3.5.4 Ferramentas para usinagem de ferro fundido*

Existem pelo menos três propriedades fundamentais de materiais requeridas em ferramentas de usinagem: tenacidade para suportar choques mecânicos e térmicos, dureza em elevadas temperaturas e estabilidade química com o material da peça. Os principais materiais utilizados em ferramentas de corte na usinagem de ferro fundido são as seguintes:



- Ferramentas de metal-duro: O metal-duro é o material mais utilizado na fabricação de ferramentas atualmente. Este tipo de ferramenta é composto por partículas duras de carbonetos ligadas geralmente com cobalto. Um aumento no conteúdo de carbonetos causa um aumento na dureza à quente, resultando em elevada resistência à abrasão e deformação plástica. Entretanto, sua tenacidade e resistência a choques térmicos tendem a diminuir (MUÑOZ DIAS; DINIZ, 2013). O principal carboneto utilizado na confecção de ferramentas de usinagem é o carboneto de tungstênio. Quando é parcialmente substituído por carbonetos de tântalo ou titânio, a estabilidade química entre o material da ferramenta e da peça aumenta. A estabilidade química é um fator importante na redução ou eliminação do desgaste de cratera da ferramenta (normalmente causada por difusão e abrasão). Há também ferramentas que utilizam níquel como ligante com resultados apontando que a vida da ferramenta diminui com o aumento do teor de níquel e que o principal mecanismo de desgaste da ferramenta é a adesão e arrancamento de partículas da ferramenta (MARQUES, 2007).

Como os cavacos formados na usinagem de ferros fundidos cinzentos são muito pequenos e não desgastam intensivamente a face da ferramenta, é dispensável que esta possua uma elevada estabilidade química. Esta é a razão por que ferramentas para a usinagem deste tipo de ferro fundido possuem majoritariamente carboneto de tungstênio, e não requerem a presença de carboneto de tântalo ou carboneto de titânio (DINIZ et al., 2003).

A maioria das ferramentas de metal-duro utilizadas para a usinagem de ferro fundido cinzento possuem camadas de revestimento microscópicas. Os principais materiais de revestimento são: carbonetos de titânio (TiC), óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), nitreto de titânio (TiN) e carbonitreto de titânio (TiCN). O principal propósito desses revestimentos é aumentar a resistência ao desgaste das camadas externas que entram em contato com o cavaco e com a peça e, ao mesmo tempo, a tenacidade do substrato da ferramenta é assegurada pelo carboneto de sua composição (DINIZ et al., 2003).

- Ferramentas de cerâmica: Segundo Diniz et al. (2003), outro tipo de material utilizado em insertos são as cerâmicas, que geralmente possuem propriedades como elevada dureza a quente, excelente resistência à abrasão, baixa condutividade térmica e ótima estabilidade química. Sua baixa tenacidade restringe que este

material seja amplamente utilizado. Há diferentes tipos de materiais cerâmicos para ferramentas de corte, cada um exibindo distintas propriedades. Os principais tipos são: materiais à base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e materiais à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). As cerâmicas à base de nitreto de silício são formadas por cristais de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com uma fase intergranular de  $\text{SiO}_2$  sinterizada com alumina (YECKLEY, 2005). Comparando-se com os materiais à base de óxido de alumínio, as cerâmicas à base de nitreto de silício possuem dureza e tenacidade mais elevadas, resistência a choques térmicos, porém possuem estabilidade química mais baixa quando é utilizada na usinagem de ferro fundido. Por isso, este tipo de material cerâmico é utilizado no fresamento de ferro fundido cinzento e não em processos de corte contínuo (p.ex. torneamento).

O cBN (Nitreto Cúbico de Boro) é também um material superduro comercialmente aplicado na indústria. Seu principal uso está relacionado à usinagem de materiais ferrosos em altas velocidades, tais como aços de elevada dureza (acima de 50  $\text{HR}_C$ ) e ferros fundidos não maleáveis, atuando em um campo em que ferramentas como PCD (diamante policristalino) não atuam, provendo também alta qualidade superficial que possibilita eliminar operações posteriores de retificação. A obtenção de insertos sinterizados de cBN se dá via compactação de pós de cBN sob alta pressão ( $> 5,5$  GPa) e altas temperaturas (acima de 1873 K) em períodos que variam desde alguns poucos minutos a até 30 minutos. O pó de cBN é misturado a um ligante, e submetido aos parâmetros de sinterização, no interior de uma matriz especial, denominada dispositivo de alta pressão (VALPASSOS et al., 2007).

Com o intuito de comparar o uso de ferramentas à base de nitreto de silício com ferramentas de metal-duro, Diniz e Ferrer (2008) realizaram experimentos de fresamento de ferro fundido cinzento GG25 em diferentes superfícies com diferentes velocidades de corte. Eles inferiram que as ferramentas cerâmicas à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  apresentaram vida mais longa que as ferramentas de metal-duro, além de serem utilizadas velocidades de corte mais elevadas com as ferramentas cerâmicas. Além disso, as ferramentas à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  são mais resistentes a impactos e outras causas de lascamentos quando comparadas às ferramentas de metal-duro.

Gabaldo et al. (2010) realizaram experimentos para analisar o desempenho de ferramentas de metal-duro e ferramentas cerâmicas à base de nitreto de silício no

fresamento de acabamento de blocos de motores fabricados com ferro fundido vermicular. Os autores concluíram que a ferramenta de metal-duro exibiu vida mais longa que a ferramenta de cerâmica para as mesmas condições de corte.

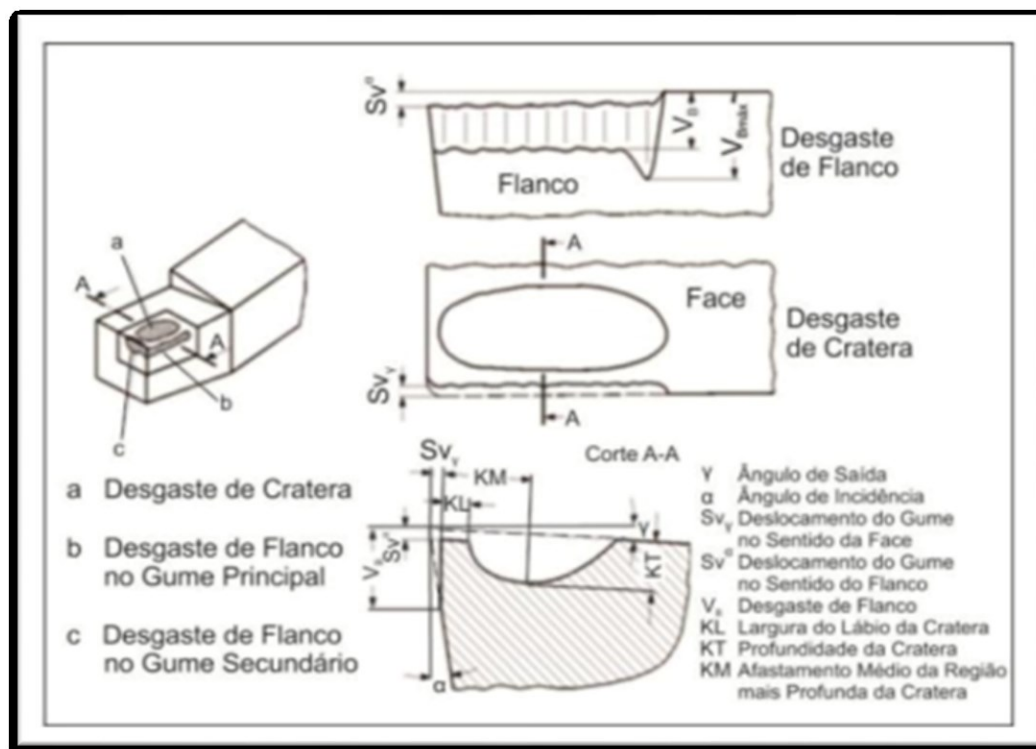
Muñoz Dias e Diniz (2013) também realizaram experimentos no fresamento de ferro fundido cinzento utilizando ferramentas cerâmicas e de metal-duro. Eles obtiveram melhores resultados de vida de ferramenta com as ferramentas cerâmicas, tendo como base o volume de material removido. Eles observaram também que a vida do inserto diminuiu com o aumento da velocidade de corte.

#### *2.3.5.5 Medição do desgaste de ferramenta*

Para determinar a vida da ferramenta de corte, é frequente utilizar valores de desgaste de flanco como critério de fim de vida. A norma ISO 3685/93 estabelece padrões de ensaio de vida de ferramenta. Para o uso de ferramentas de cerâmica esta norma determina, como critério de fim de vida de ferramenta, um desgaste de flanco (VB) correspondente a 0,3 mm. A Figura 14 apresenta as diversas formas de desgaste e as grandezas a serem medidas na ferramenta.

Segundo Diniz et al. (2003), convencionou-se medir os desgastes no plano ortogonal da ferramenta. Distinguem-se os desgastes na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta. Na superfície de saída tem-se os desgastes profundidade de cratera (KT), largura da cratera (KL) e distância do centro da cratera ao gume de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (VB), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco (VBmáx).

**Figura 14-** Desgastes de flanco e de cratera



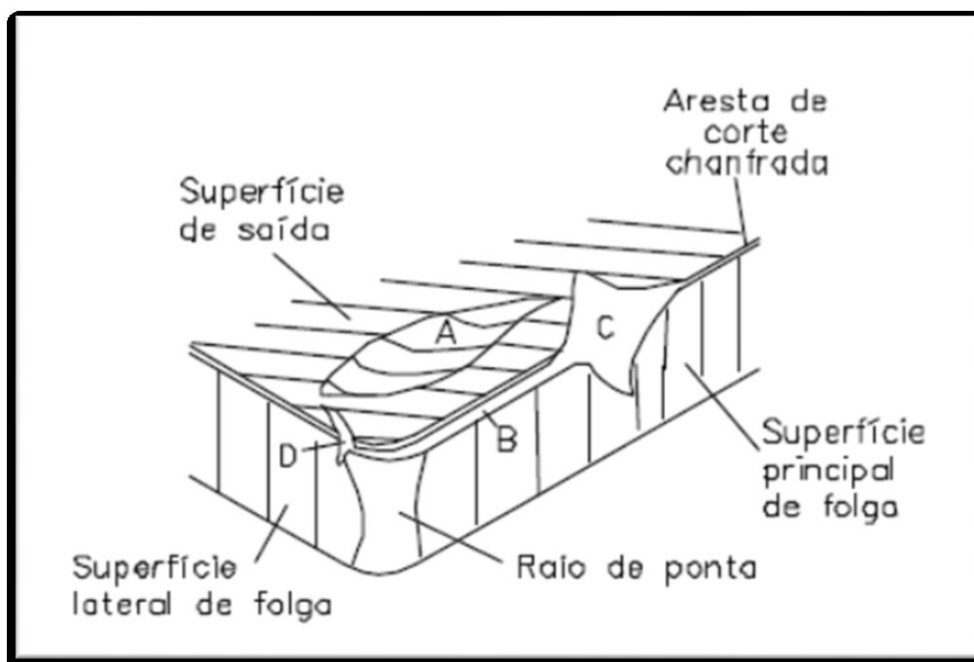
Fonte: Pereira, 2012.

### 2.3.5.6 Mecanismos de desgaste da ferramenta

A interação entre ferramenta, cavaco e peça geralmente causa desgaste, bem como avarias à ferramenta tais como lascamento e fraturas térmicas e/ou mecânicas (Figura 15). Os principais mecanismos de desgaste de ferramentas são formação de gume postiço, abrasão, adesão, difusão e oxidação. Abaixo são discutidos os principais mecanismos presentes no processo de fresamento de ferro fundido cinzento.

O fenômeno de abrasão ocorre quando o material da peça contém partículas de elevada dureza. Tanto desgaste de flanco quanto desgaste de cratera podem ser gerados por abrasão. A capacidade de a ferramenta resistir ao desgaste por abrasão está relacionada à sua dureza. A superfície da ferramenta que sofre este mecanismo geralmente exibe ranhuras paralelas à direção de corte (MUÑOZ DIAS; DINIZ, 2013).

**Figura 15-** Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte



Fonte: Ezugwu, 2005.

O fenômeno de adesão ocorre quando duas superfícies metálicas estão em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte, formando-se entre elas um extrato metálico que provoca aderência. A resistência deste extrato é elevada a tal ponto que, na tentativa de separar as superfícies, ocorre ruptura em uma das superfícies metálicas, e não no extrato. Assim, partículas da superfície de um metal migram para a superfície do outro. O fenômeno de adesão está presente na formação do gume posticho de corte, mas pode-se ter desgaste por adesão em outras situações, como no desgaste de entalhe. Para minimizar a adesão, recomenda-se que a ferramenta tenha revestimento com materiais de baixo coeficiente de atrito como, por exemplo, o nitreto de titânio. Em geral, as seguintes regiões e condições promovem o fluxo irregular de cavaco, contribuindo assim para o mecanismo de desgaste por adesão: a zona de escorregamento, o corte interrompido, profundidade de usinagem irregular ou a falta de rigidez (DINIZ et al., 2003).

De acordo com Machado et al. (2011), a difusão é um mecanismo de desgaste que envolve a transferência de átomos entre dois materiais. Segundo Diniz et al. (2003), este mecanismo é fortemente dependente da temperatura, da duração

do contato e da afinidade físico-química dos dois materiais envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). A difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera. A taxa de desgaste por difusão aumenta com a temperatura e, portanto, com a velocidade de corte.

No fresamento a temperatura da ferramenta não é tão elevada quanto em processos contínuos, devido às interrupções de corte e, conseqüentemente, a difusão é menos comum de ocorrer. Como neste fenômeno ocorre a remoção de partículas minúsculas da ferramenta, em nível atômico, as áreas de ocorrência de difusão apresentam uma aparência lisa e regular (TRENT; WRIGHT, 2000).

Durante a usinagem o tungstênio e o cobalto formam filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente levados pelo atrito, gerando desgaste. Porém, alguns óxidos, como o óxido de alumínio, são mais duros e resistentes. Assim, alguns materiais de ferramenta (que não contêm óxido de alumínio) desgastam-se mais facilmente por oxidação. O desgaste gerado pela oxidação ocorre especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso de ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (DINIZ et al., 2003).

### **2.3.6 Etapas do processo de fundição**

O processo de fundição é fundamental na indústria para a produção de uma ampla gama de produtos, desde peças simples até componentes complexos de máquinas e equipamentos. A fundição é especialmente útil para produzir peças em grandes quantidades e de formas intrincadas, enquanto a usinagem é essencial para alcançar tolerâncias precisas e acabamentos específicos. Juntos, esses métodos formam uma parte essencial da fabricação industrial moderna.

#### *2.3.6.1 Projeto Inicial*

A primeira etapa do ciclo de vida do processo de fundição começa com o projeto inicial. Neste estágio, a quantificação de informações é vital para determinar os parâmetros do projeto, como a geometria da peça, o material a ser utilizado, as tolerâncias dimensionais e as propriedades mecânicas necessárias. As informações

quantificadas ajudam os engenheiros a criar modelos precisos da peça e a calcular o volume de material necessário.

#### *2.3.6.2 Seleção de Materiais*

A escolha do material de fundição é um aspecto crítico do processo. As informações quantificadas sobre as propriedades dos materiais, como resistência à tração, densidade, condutividade térmica e resistência à corrosão, auxiliam na seleção do material mais adequado para a aplicação específica. Isso não só afeta a qualidade do produto final, mas também seu desempenho e durabilidade.

#### *2.3.6.3 Fabricação de Moldes e Modelos*

Na fase de fabricação de moldes e modelos, a quantificação de informações é essencial para garantir que as dimensões do molde sejam precisas. Modelos digitais 3D e software de CAD (*Computer-Aided Design*) ajudam a criar representações detalhadas da peça a ser fundida. Essas representações incluem informações quantitativas sobre as dimensões, tolerâncias e acabamento superficial desejados.

#### *2.3.6.4 Processo de Fundição*

Durante o processo de fundição propriamente dito, as informações quantificadas são usadas para controlar variáveis críticas, como temperatura do metal, velocidade de vazamento, pressão e tempo de solidificação. A monitorização em tempo real desses parâmetros, muitas vezes com a ajuda de sensores e sistemas de controle automatizados, assegura que o produto final atenda às especificações desejadas.

#### *2.3.6.5 Inspeção de Qualidade*

Após a fundição, a quantificação de informações continua a desempenhar um papel importante na inspeção de qualidade. Técnicas avançadas, como a tomografia computadorizada e a análise por ultrassom, são utilizadas para avaliar a

integridade da peça fundida, identificar possíveis defeitos e medir as dimensões finais. Essas informações quantitativas são cruciais para determinar se a peça atende aos padrões de qualidade estabelecidos.

#### *2.3.6.6 Análise de Desempenho*

Finalmente, a quantificação da informação é também relevante na análise de desempenho do produto final. Os testes de laboratório e simulação computacional podem fornecer dados quantitativos sobre resistência, durabilidade e outras características importantes. Estas informações são necessárias para garantir que a peça fundida funcione como o esperado em sua fase final.

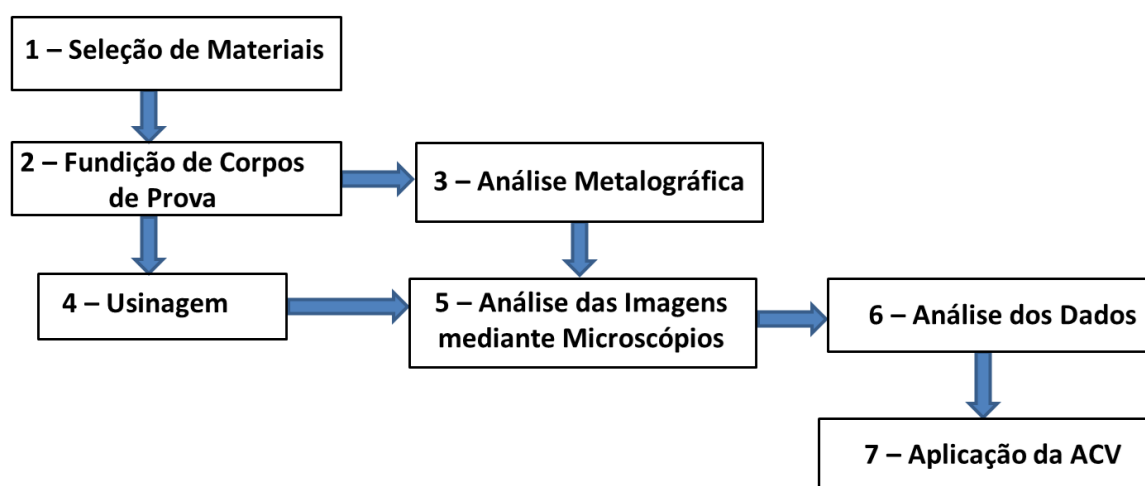
Em resumo, a quantificação da informação desempenha um papel crítico em cada fase do ciclo de vida do processo de fundição, desde a concepção inicial até a análise de desempenho. Ele ajuda a garantir a qualidade, eficiência e sustentabilidade do processo de fundição, contribuindo assim para a fabricação de produtos de metal de alta qualidade que atendam às necessidades da atual indústria.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho divide-se em duas partes: (a) obtenção dos materiais utilizados na pesquisa, incluindo os elementos advindos de sucata para a fabricação do ferro fundido, e nióbio reciclado utilizado; (b) detalhamento e cálculo do impacto ambiental do processo, utilizando-se o software gratuito OpenLCA 1.9.0. Um detalhamento das etapas aplicadas no desenvolvimento deste trabalho é mostrado na Figura 16.

**Figura 16-** Etapas aplicadas no desenvolvimento deste trabalho



Fonte: Autor, 2024.

A realização dos experimentos que compõem este trabalho foi efetuada em duas empresas de fundição, as quais disponibilizaram alguns de seus laboratórios para adição de nióbio na liga de ferro e o material necessário para a fundição dos corpos de prova.

- **Fase 1. Seleção de materiais**

A seleção de materiais desempenha um papel crucial em qualquer experimento de fundição, pois afeta diretamente a qualidade e a confiabilidade dos

resultados obtidos. A fundição é um processo no qual um material é fundido e moldado em uma forma desejada, e a escolha dos materiais envolvidos influencia desde a temperatura de fusão até as características finais do produto. Para este estudo foram utilizados alguns materiais advindos de sucata (por exemplo, sucatas contendo nióbio).

- **Fase 2. Fundição de corpos de prova**

A fundição de corpos de prova (lingotes) é um processo fundamental na indústria metalúrgica e na engenharia de materiais, utilizado para avaliar a qualidade e as propriedades mecânicas de ligas metálicas e outros materiais. Esses corpos de prova são pequenos espécimes representativos que são fabricados mediante técnicas de fundição para posterior teste em laboratórios. No presente estudo os corpos de prova foram fundidos em uma empresa do polo industrial da cidade de Joinville em Santa Catarina.

- **Fase 3. Análise metalográfica**

A metalografia é uma técnica essencial no campo da metalurgia e ciência dos materiais, tendo um papel crucial na compreensão, desenvolvimento e melhoria de materiais metálicos. A análise metalográfica envolve o estudo da microestrutura dos metais e ligas por meio da observação de seções finas de amostras sob um microscópio óptico ou eletrônico. A importância da metalografia pode ser destacada em várias áreas:

- Controle de Qualidade: Ao examinar a estrutura microscópica de uma amostra, os engenheiros podem identificar defeitos, inclusões, trincas e outras imperfeições que poderiam comprometer o desempenho do material.

- Desenvolvimento de Novos Materiais: Na criação de ligas metálicas mais resistentes, leves e duráveis, é preciso compreender profundamente como a microestrutura afeta as propriedades mecânicas e químicas dos materiais. A metalografia permite o estudo detalhado das fases presentes e da distribuição de grãos, auxiliando na criação de materiais sob medida para aplicações específicas.

- Pesquisa Científica: A metalografia contribui para que os pesquisadores possam compreender os fenômenos metalúrgicos, as diferentes fases da evolução da microestrutura em diferentes condições de processamento e também a relação entre essa microestrutura e o comportamento mecânico dos materiais.
- Previsão de Comportamento em Serviço: Na análise metalográfica pode-se prever como um material se comportará em condições reais de serviço. Isso é importante em setores críticos, como aeroespacial e indústria nuclear, em que a confiabilidade dos materiais é fundamental.
- Resolução de Problemas: Normalmente, a metalografia é usada para investigar as causas subjacentes de falha em componentes metálicos quando esses fracassam. Isso tanto pode ajudar a evitar futuras falhas como melhorar o design e fabricação do processo.
- Melhoria de Processos de Fabricação: Analisando a microestrutura dos materiais após cada uma das diferentes etapas de processamento, as empresas podem melhorar seu método de produção obtendo produtos mais consistentes e de melhor qualidade.
- Educação e Treinamento: A metalografia desempenha um papel importante na educação e treinamento de engenheiros e cientistas de materiais, fornecendo uma base sólida para entender os princípios fundamentais dos materiais metálicos.

A metalografia é uma ferramenta que tem um papel crucial na melhoria da qualidade dos materiais metálicos, no desenvolvimento de novas ligas, e na garantia da segurança e confiabilidade em uma variedade de aplicações industriais. Sem a metalografia, seria muito mais difícil avançar na ciência dos materiais e na tecnologia.

- **Fase 4a. Usinagem (Avaliação do desgaste da ferramenta)**

A avaliação do ciclo de vida da ferramenta de corte desempenha um papel importante na indústria de usinagem, ele é um processo essencial para garantir a eficiência, a qualidade e a economia nas operações de usinagem. Os testes de

usinagem são conduzidos minuciosamente para determinar a durabilidade e o desempenho de uma ferramenta de corte ao longo de sua vida.

Os testes de usinagem são realizados conforme listado abaixo:

- Seleção da Amostra: Um grupo representativo de ferramentas de corte é escolhido para testes. Estes testes podem incluir diferentes marcas, tipos de ferramentas e materiais de trabalho.
- Definição de Parâmetros: Os parâmetros de corte escolhidos (como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte) são cuidadosamente definidos. Esses parâmetros afetam diretamente a vida da ferramenta.
- Monitoramento Contínuo: Enquanto ocorrem os testes, as ferramentas são monitoradas para medir tanto o desgaste, quanto a quebra ou outras formas de deterioração. Isso é frequentemente efetuado usando-se equipamentos como microscópios e sensores.
- Análise de Dados: Os dados coletados durante os testes de usinagem são analisados para determinar em qual momento a ferramenta de corte atinge o fim de sua vida. Isso baseado em critérios específicos, como um limite de desgaste tolerável.

Os testes de usinagem têm um papel importante na avaliação do ciclo de vida da ferramenta de corte. Eles garantem a qualidade das peças usinadas, aumenta a eficiência de produção e controla os custos de manutenção. Ao investir tempo e recursos em avaliações rigorosas com testes de usinagem, as empresas podem colher os benefícios de operações de usinagem mais eficazes.

- **Fase 4b. Usinagem (Ruídos dos processos de usinagem)**

O nível de pressão sonora é representado em decibéis (dB) em uma escala logarítmica devido à sua ampla faixa de variação (ZANUTO, 2016). Por outro lado, o ruído é normalmente descrito como um tipo de som ou conjunto de sons indesejáveis, constituindo um fenômeno acústico audível capaz de impactar negativamente as pessoas (CUNHA; RESENDE, 2012).

O ruído industrial e as doenças ocupacionais relacionadas a ele são temas de estudo relevantes, devido às compensações trabalhistas, à redução da

produtividade no ambiente de trabalho e aos custos médicos associados a essas doenças (DE MELLO JUNIOR, 1998; SMITH et al., 2023).

Nesta fase o monitoramento do ruído do processo de usinagem de material fundido é observado com a utilização de um sonômetro para atestar se os limites de tolerância estão dentro da norma regulamentadora (NR 15) (BRASIL, 2012).

- **Fase 4c. Usinagem (Acabamento da peça)**

A textura da superfície resultante da usinagem é influenciada por diversos fatores, como: o material e a geometria da ferramenta de corte, o material e a geometria da peça, as condições de corte e a rigidez da máquina-ferramenta. Normalmente, durante a usinagem ou após, a superfície usinada é verificada para observar se há conformidades com as tolerâncias dimensionais e a rugosidade especificada no projeto da peça. Os erros dimensionais são, em geral, mais simples de medir e controlar, dependendo principalmente do processo e da rigidez da máquina-ferramenta utilizada. Já a rugosidade pode ser avaliada por meio de uma variedade de parâmetros, utilizando diferentes tipos de instrumentos e técnicas de medição (MARTIN, 2015).

Na análise do acabamento superficial do material fundido após o processo o processo de usinagem é utilizado rugosímetro de bancada.

- **Fase 5. Análise de imagens mediante microscópios óptico e eletrônico**

As imagens obtidas por meio de microscópios ópticos e eletrônicos desempenham um papel importante na fundição. Os microscópios ópticos e eletrônicos são ferramentas valiosas que permitem aos pesquisadores envolvidos com o processo de fundição examinar e observar as estruturas dos materiais metálicos após o processo de fabricação. A importância dessas imagens pode ser destacada nos seguintes aspectos:

- Controle de Qualidade: A fundição pode ser considerada um processo sensível, em que a qualidade dos materiais fundidos desempenha um papel crítico na durabilidade e desempenho dos produtos finais. Os microscópios ópticos também

ajudam a identificar imperfeições, como bolhas de ar, impurezas ou inclusões que podem comprometer a qualidade do metal fundido;

- Avaliação da Microestrutura: A microestrutura de um material metálico é fundamental para suas propriedades mecânicas e térmicas. Os microscópios ópticos permitem a observação de forma detalhada das características da microestrutura, como o tamanho e a forma dos grãos, e também a presença de fases indesejadas e a distribuição de impurezas.

- Otimização de Processos: Com a utilização de imagens microscópicas, os engenheiros do setor de fundição podem ajustar os parâmetros do processo de fabricação, como temperatura, velocidade de resfriamento e composição do material, com o objetivo de obter propriedades desejadas no produto final. Isso ajuda a otimizar a eficiência do processo de fundição;

- Pesquisa e Desenvolvimento: Na busca por ligas metálicas mais avançadas e eficientes, a análise microscópica desempenha um papel importante na pesquisa e desenvolvimento de novos materiais. Os cientistas podem usar microscópios ópticos para entender melhor as propriedades dos materiais em nível microscópico;

- Garantia da Conformidade com Padrões: Em alguns setores, como o automobilístico e aeroespacial, existem rigorosos padrões de qualidade que devem e precisam ser atendidos. As imagens obtidas por microscópios fornecem evidências objetivas da conformidade com esses padrões, garantindo a segurança e confiabilidade dos produtos.

- Solução de Problemas: Quando ocorrem defeitos ou problemas de qualidade em produtos fundidos, os microscópios são usados para investigar as causas. Isso ajuda a identificar a origem do problema e implementar medidas corretivas eficazes.

Portanto, as imagens obtidas por microscópios ópticos e eletrônicos desempenham um papel vital na indústria de fundição, contribuindo para a produção de materiais metálicos de alta qualidade e também para o desenvolvimento contínuo de processos de fabricação que sejam mais eficientes e inovadores. Essas ferramentas permitem um nível de controle e análise detalhada que são essenciais para atender às demandas cada vez mais rigorosas da indústria moderna.

- **Fase 6. Análise dos dados**

A análise de dados desempenha um papel fundamental na avaliação do ciclo de vida (ACV) de produtos, processos e sistemas. Essa abordagem é essencial para entender e melhorar o impacto ambiental de produtos e serviços ao longo de seu ciclo de vida completo, desde a extração de matérias-primas até o descarte final.

A ACV requer uma quantidade significativa de dados, incluindo informações sobre emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais, energia consumida e poluentes liberados. A análise de dados permite a coleta precisa dessas informações, muitas vezes a partir de várias fontes, garantindo que a ACV seja baseada em dados confiáveis.

- **Fase 7. Aplicação da ACV**

De posse dos dados, pode-se quantificar o impacto ambiental de cada etapa do processo. Isso geralmente é feito usando ferramentas de software especializadas que calculam indicadores como pegada de carbono, consumo de água, toxicidade, entre outros. Os resultados ajudam a identificar quais aspectos do processo têm o maior impacto ambiental. Para este estudo foi utilizado o software OpenLCA 1.9.0. As etapas de aplicação da ACV serão descritas em detalhes na seção 4.6.

## 4 ETAPAS DO PROCESSO DE OBTENÇÃO DAS PEÇAS

### 4.1 FUNDIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A investigação dos efeitos da adição de nióbio advindo de sucata sobre a usinabilidade, incluindo a microestrutura do ferro fundido cinzento, é complexa, uma vez que os resultados dependem de diversos fatores que costumam ser muito variáveis em um processo de fundição, tais como: temperatura de fusão, temperatura de vazamento, composição química da carga fundida, tempo de resfriamento no molde, entre outros.

Portanto, no desenvolvimento deste trabalho, buscou-se manter as mesmas condições de fusão, composição química e equipamentos, variando apenas o percentual da adição de nióbio reciclado utilizados na transferência do material para a panela de vazamento. A realização de todos os experimentos que compõem este trabalho foi efetuada na fundição de uma empresa localizada em Joinville (SC), bem como outra empresa de reciclagem de materiais metálicos em São Paulo. Foi disponibilizado todo o suporte necessário, incluindo toda a estrutura do laboratório de análise de materiais e os equipamentos necessários para a fundição dos corpos de prova.

O desenvolvimento do trabalho divide-se em duas partes, sendo a primeira parte responsável por apresentar todos os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa, tal como o ferro fundido cinzento, o processo de reciclagem dos metais utilizados, o ensaio de usinabilidade, bem como todos os elementos envolvidos. A segunda etapa destina-se ao detalhamento dos impactos ambientais gerados pelo processo de fundição.

No estudo foi utilizado o ferro fundido cinzento GG-25 a partir de material advindo de sucata. Conforme a norma DIN EN 1561 (1997), este material deve apresentar uma resistência à tração entre 250 N/mm<sup>2</sup> e 350 N/mm<sup>2</sup> e uma dureza entre 180 HB e 250 HB. Ainda de acordo com essa norma, sugere-se uma composição química para o material conforme apresentada na Figura 17.



**Figura 17-** Composição química do ferro fundido

Elementos	C	Si	Mn	P <sub>máx</sub>	S <sub>máx</sub>
% em Peso	3,1 - 3,3	1,6 - 1,8	0,7 - 0,9	0,15	0,10

Fonte: Norma DIN EN 1561.

Fonte: Norma DIN EM 1561 (1997)

Todo material utilizado foi então separado e pesado em balança de precisão. Sendo assim, a liga do material utilizado foi preparada em um forno de indução, com temperatura em torno de 1480 °C. Seguindo o protocolo para este tipo de processo, foi retirada uma pequena amostra em formato de moeda para análise química, com a finalidade de realizar ajuste da composição desejada. Depois, a temperatura do forno foi elevada para 1505 °C para homogeneização. O nióbio reciclado (Figura 18) e previamente separado nas proporções de 0,2%, 0,6% e 0,8% do volume de 5 kg dos moldes de areia foi adicionado na transferência do fundido para panela de vazamento.

**Figura 18-** Béquer com nióbio reciclado

Fonte: Autor, 2024.

Paralelamente ao processo de fundição da liga, misturadores de areia foram acionados para a preparação da areia a ser utilizada nos moldes, adicionando-se a esta a composição necessária para a confecção dos moldes. Inclui-se em tal composição a areia reciclada e aglomerante, de maneira a resultar em uma melhor qualidade dos moldes (Figura 19).

**Figura 19-** Molde de areia



**Fonte:** Autor, 2024.

Já de posse da liga fundida e dos moldes, o processo de vazamento da panela para os moldes é feito de forma manual, em que o colaborador devidamente equipado vaza o líquido metálico nos moldes confeccionados em linha de produção para posterior resfriamento (Figuras 20, 21 e 22). A forma final da liga fundida neste experimento será de blocos com dimensões 230 x 70 x 30 mm, e peso de 5 kg (Figura 20).

**Figura 20-** Moldes com metal vazado



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 21-** Retirada de amostra



Fonte: Autor, 2024.

**Figura 22-** Blocos fundidos

Fonte: Autor, 2024.

#### 4.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

O ensaio metalográfico foi realizado para o estudo da influência da adição do nióbio reciclado na microestrutura, o que irá permitir relacionar as propriedades com a usinabilidade do material. O procedimento de análise metalográfica foi efetuado em acordo com as normas NBR 13284:95 (BRASIL, 2015) e NBR 6593:81 (BRASIL, 2015). A caracterização microestrutural foi realizada na região central das amostras retiradas do corpo de prova fundidos. A preparação das amostras para análise metalográfica consistiu no embutimento das amostras e lixamento utilizando-se lixas d'água de 220 e 400 mesh, seguida de polimento em politriz, utilizando alumina como abrasivo (Figura 23).

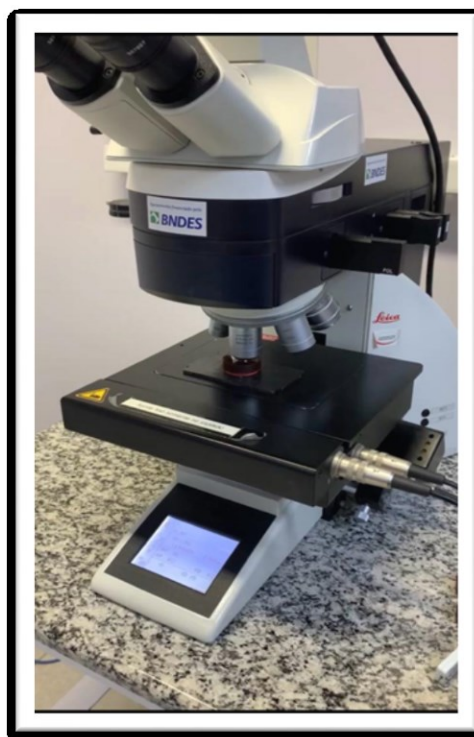
Para a caracterização da matriz, realizou-se o ataque aplicando-se o reagente Nital 4%, que possibilita identificar os microconstituintes perlita e ferrita. Para a contagem do número de células eutéticas foi empregado o reagente Stead, que revela segregações de fósforo e enxofre, e de contornos de células. Em cada amostra foram analisadas três imagens, ampliadas 100 vezes. As imagens para a análise metalográfica foram obtidas utilizando-se um microscópio óptico de microdissecção a laser Leica – LMD6 & LMD7 de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes, de acordo com a Figura 24. A captura e análise das imagens foram possíveis com a ajuda do software Image Pró-Plus (2023).

**Figura 23-** Amostras embutidas



**Fonte:** Autor, 2024.

**Figura 24-** Microscópio óptico Leica LDM6 & LDM7



**Fonte:** Autor, 2024.



### 4.3 ENSAIO DE USINABILIDADE

Para realizar uma análise comparativa da usinabilidade do ferro fundido cinzento com adição de nióbio reciclado, foi adotado como critério de fim de vida da ferramenta um desgaste de flanco  $VB = 0,3$  mm, conforme a norma ISO 3685 (BRASIL, 2015). Neste ensaio de fresamento foi utilizada uma amostra com percentual de 0,8% de adição de nióbio reciclado.

O inserto utilizado foi da marca Lamina OFMT 050405 (octogonal, possuindo 8 arestas) e, para este ensaio, foi utilizada apenas uma aresta de corte de cada um dos quatro insertos. Os parâmetros de usinagem foram obtidos do fabricante do inserto: velocidade de corte  $v_c = 230$  m/min; avanço por dente  $f_z = 0,39$ mm; e profundidade radial  $a_e = 1,5$  mm. Foram realizadas 10 passadas da ferramenta na fresadora mostrada na Figura 25 (peça fixada na morsa). A profundidade axial de corte  $a_p$  de cada passada foi de 2,0 mm, e foram efetuados igual número de passes para cada inserto, e os desgastes foram comparados.

**Figura 25-** Fresadora ferramenteira Sinitron (2010)



Fonte: Operatrix, 2023

Depois disto, o inserto foi removido e sua aresta foi avaliada a fim de verificar

o desgaste de flanco. Para quantificar o desgaste de flanco da ferramenta de corte utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura mostrado na Figura 26.

**Figura 26-** Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Autor, 2024.

#### 4.4 MEDIÇÃO DO NÍVEL SONORO

Para aferir o nível de ruído, empregou-se um medidor de nível sonoro DEC-460 (Figura 27) com uma amplitude de medição entre 35 dB e 130 dB. O dispositivo foi posicionado próximo ao ouvido do operador do equipamento em uso.

**Figura 27-** Medidor de nível sonoro

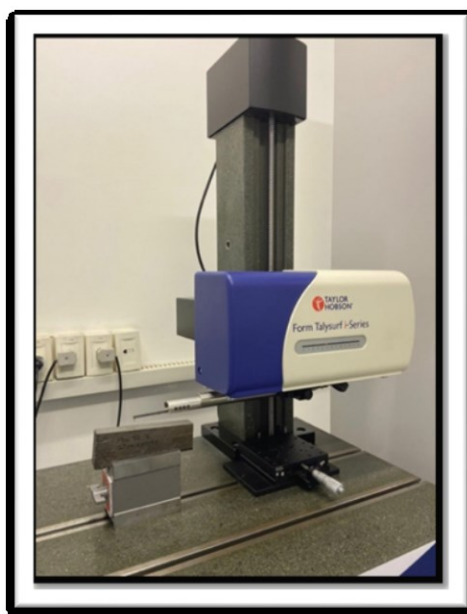


Fonte: Autor, 2024.

#### 4.5 MEDIÇÃO DO ACABAMENTO SUPERFICIAL

A rugosidade presente na superfície dos corpos de prova, após serem usinados no processo de fresamento, foi avaliada utilizando-se um rugosímetro de bancada fabricado pela Taylor Hobson, modelo Talysurf i-Series, conforme ilustrado na Figura 28.

**Figura 28-** Rugosímetro de bancada



**Fonte:** Autor, 2024.

#### 4.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O desenvolvimento da análise do ciclo de vida se dá em duas partes: A primeira se refere à produção dos blocos fundidos, e a segunda na efetiva aplicação da ACV no processo fundição. O Quadro 4 mostra quais foram as etapas realizadas no experimento e consideradas na ACV.

Na etapa de preparação da liga para fundição, todo o material advindo de sucata é separado com auxílio de um separador magnético balístico SMB (RMA Representação, 2024), mostrado na Figura 29, equipamento que atua por meio de alta velocidade da correia e força magnética, proporcionando a separação precisa do material (BROOKS et al., 2019). Este material é pré-selecionado por uma cooperativa instalada a uma distância de 30 km da planta da empresa. O material



utilizado nesse experimento foi transportado da cooperativa até a empresa de fundição em que foi realizado o experimento.

#### Quadro 4- Fases para a obtenção das peças fundidas

Ordem	Fases
1	Reciclagem de Nióbio
2	Reciclagem de areia
3	Seleção de material
4	Preparação do molde
5	Fundição
6	Inoculação
7	Peça fundida

Fonte: Autor, 2024.

#### Figura 29- Separador de material

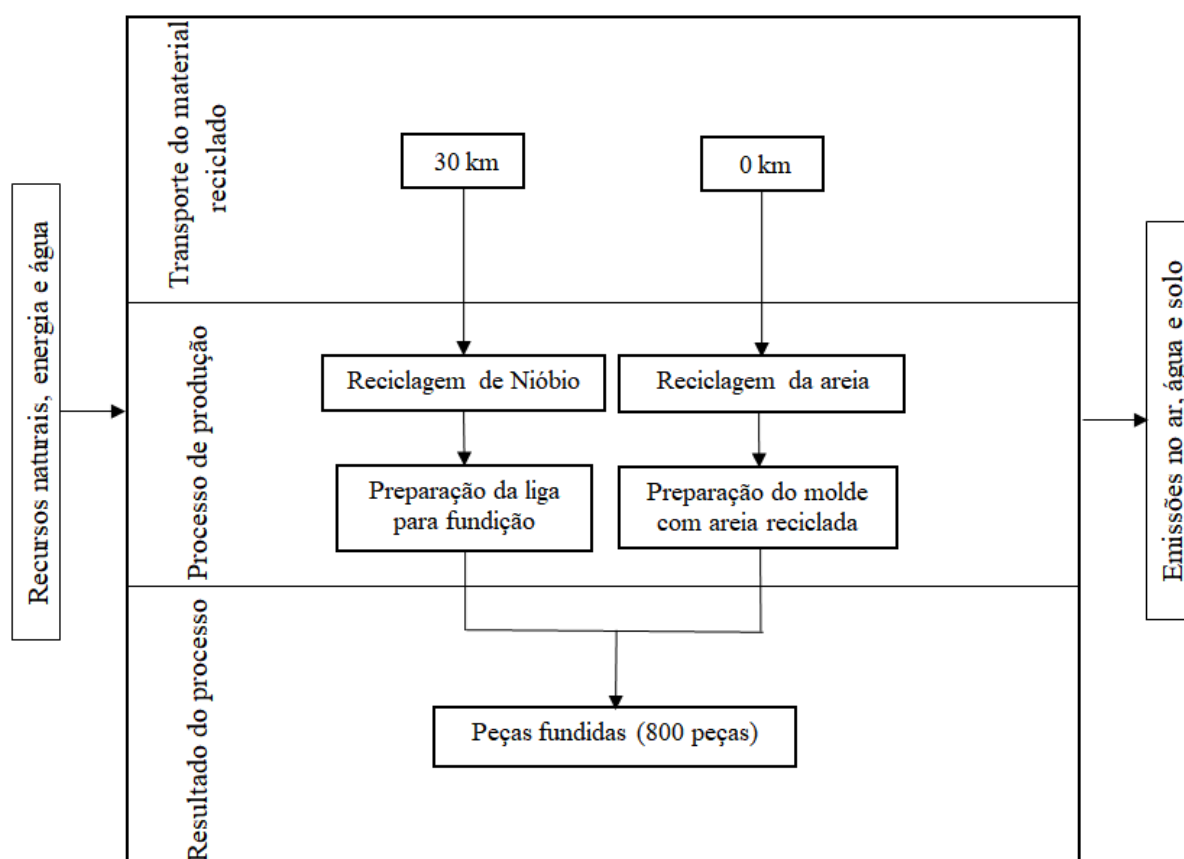


Fonte: RMA Representação (2024).

A Figura 30 mostra as delimitações de fronteiras utilizadas nesta pesquisa. O processo realizado na empresa utilizou a quantidade de material necessária para produzir 20 lingotes. No entanto, para modelagem de software, foram considerados como unidade funcional 800 lingotes de ferro fundido cinzento com adição de nióbio,

que é a quantidade padrão de produção em uma grande empresa. O software OpenLCA foi executado para 20 e 800 lingotes, e o resultado mostrou um comportamento linear entre o número de lingotes e os impactos ambientais.

**Figura 30-** Limites do sistema considerado para a produção da peça



Fonte: Autor, 2024

O estudo de caso foi realizado de acordo com as normas NBR ISO 14040 (2006) e NBR ISO 14044 (2006), que listam as seguintes etapas:

- Objetivo e escopo do estudo;
- Análise de inventário de ciclo de vida;
- Avaliação do impacto do ciclo de vida;
- Interpretação do ciclo de vida.

A Tabela 1 mostra os insumos utilizados no processo de fundição para produzir 800 lingotes, com as quantidades e unidades de medidas utilizadas tanto no experimento prático, quanto na inserção dos dados para quantificação no software

para estudo da análise do ciclo de vida do processo. Os valores de consumo de energia elétrica foram obtidos dos manuais dos fabricantes dos equipamentos, enquanto as massas (em kg) foram obtidas mediante balança de precisão.

**Tabela 1-** Valores de entrada e saída para o processo de fundição

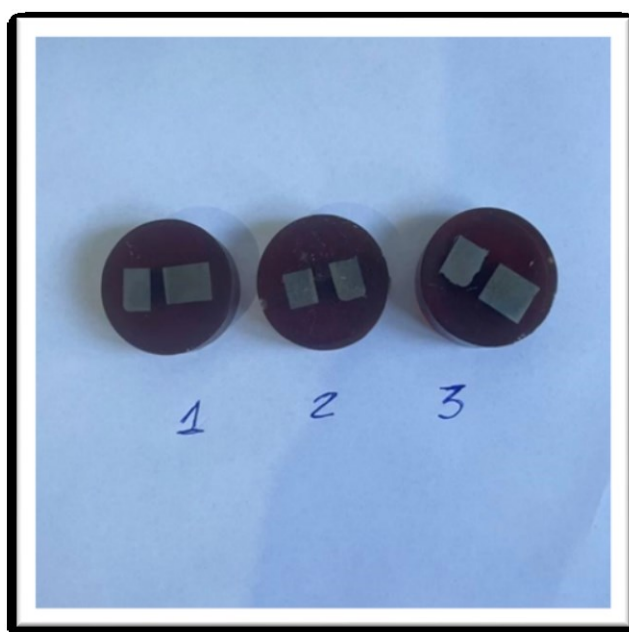
<b>Etapas do processo</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
<b>Reciclagem de Nióbio</b>		
<b>Entradas:</b> Energia elétrica (alta voltagem)	kWh	79
Sucata de ferro	kg	1600
Sucata de aço	kg	1600
Transporte	km	30
<b>Saída:</b> Nióbio reciclado	kg	32
<b>Reciclagem de Areia</b>		
<b>Entradas:</b> Energia elétrica (alta voltagem)	kWh	184,3
Areia de fundição (resíduo)	kg	768
<b>Saída:</b> Areia reciclada	kg	567
<b>Fundição</b>		
<b>Entradas:</b> Sílica	kg	56
Carboneto de Boro	kg	0,0040
Carbono	kg	138
Energia elétrica (alta voltagem)	kWh	140
Sucata de ferro	kg	3383
Manganês	kg	17,28
Nióbio reciclado	kg	32
Fósforo	kg	136,8
Silício	kg	237
<b>Saída:</b> Ferro fundido cinzento	kg	4000
<b>Molde com areia reciclada</b>		
<b>Entradas:</b> Areia de sílica	kg	278
Areia reciclada	kg	567
Bentonita	kg	144
Energia elétrica (alta voltagem)	kWh	45
Água	kg	48
<b>Saída:</b> Molde com areia reciclada	Itens	800
<b>Peça fundida (800 peças)</b>		
<b>Entradas:</b> Molde com areia reciclada	Itens	800
Ferro fundido cinzento	kg	4000
Água	kg	30
<b>Saída:</b> Peça fundida	Itens	800

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISE METALOGRÁFICA

No procedimento experimental desta pesquisa, a amostra foi seccionada, embutida a quente em corpos de baquelite (Figura 31) e preparada conforme as seguintes etapas: lixamento, polimento e ataque químico (DEDAVID et al., 2007). A identificação das amostras foi realizada de acordo com a Tabela 2.

**Figura 31-** Amostras embutidas para análise



Fonte: Autor, 2024.

**Tabela 2-** Percentual de nióbio

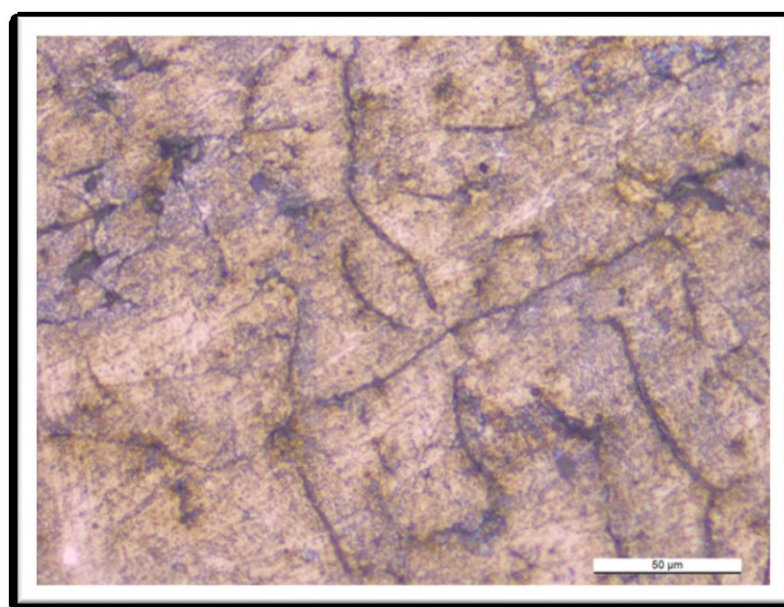
Amostra	% Nióbio
1	0,2
2	0,6
3	0,8

Fonte: Autor, 2024

### 5.1.1 Amostra 01

Observa-se na Figura 32 que a amostra 01 apresenta partículas pretas alongadas, que são denominadas grafita lamelar, que são típicas do ferro fundido cinzento. A grafita lamelar desempenha um papel fundamental na melhoria das propriedades do ferro fundido cinzento, tornando-o um material de escolha em diversas aplicações industriais. Esses benefícios estão relacionados principalmente à sua microestrutura única e às características mecânicas resultantes.

**Figura 32-** Amostra 01 (0,2% Nb)



**Fonte:** Autor, 2024.

Materiais que apresentam grafita lamelar possuem uma capacidade de absorção de vibrações. Isso torna este material ideal para componentes que precisam resistir a cargas dinâmicas, como blocos de motor, tambores de freio e caixas de engrenagens.

A grafita lamelar reduz o desgaste das ferramentas de corte durante o processo de usinagem, tornando-o mais eficiente e econômico. Isso é particularmente importante em aplicações que requerem peças com tolerâncias apertadas (FRANZEN et al., 2020)

Sua elevada resistência à corrosão o torna adequado para ambientes adversos, como aplicações marítimas e industriais. A grafita lamelar também

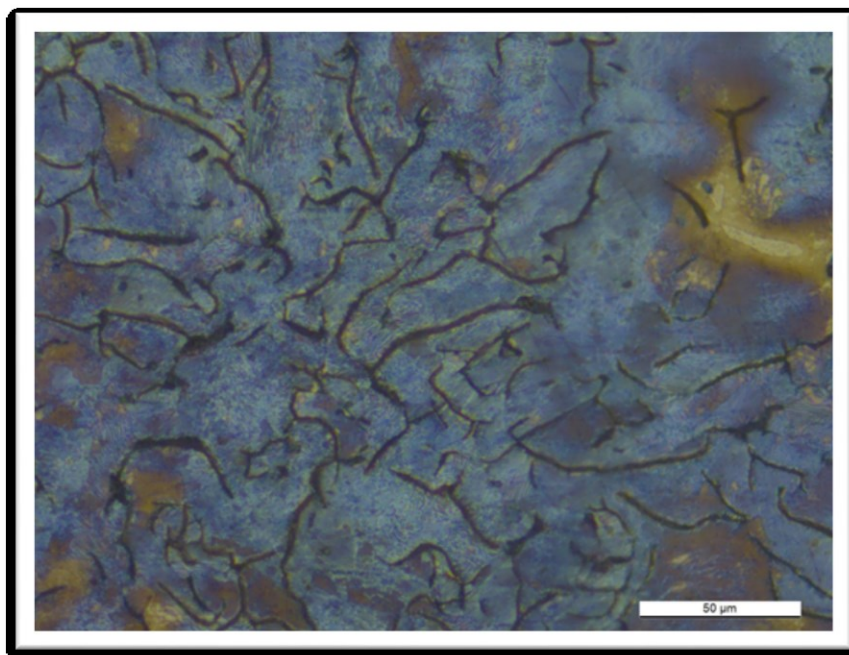
melhora a capacidade de dissipação de calor do ferro fundido cinzento. A presença da grafita lamelar permite que o ferro fundido cinzento seja facilmente conformado em formas mais complexas durante o processo de fundição, o que o torna versátil para muitas aplicações.

A combinação de todas essas características torna o ferro fundido cinzento com grafita lamelar altamente durável e com a vida prolongada em muitas aplicações.

### 5.1.2 Amostra 02

A amostra 02, mostrada na Figura 33, também apresenta formação de grafita e, em especial, a formação de perlita. A formação de perlita no ferro fundido é um processo metalúrgico que proporciona uma série de benefícios significativos para a indústria metalúrgica e outras aplicações. A perlita é uma microestrutura constituída por lamelas alternadas de ferrita e cementita (um composto de ferro e carbono), e sua formação ocorre por meio do resfriamento controlado do ferro fundido.

**Figura 33-** Amostra 02 (0,6% Nb)



Fonte: Autor, 2024

A perlita confere ao ferro fundido uma resistência mecânica elevada. Essa microestrutura oferece uma combinação equilibrada de dureza e tenacidade, tornando o material mais capaz de suportar cargas e impactos, o que é fundamental em aplicações de engenharia.

A perlita também contribui para a resistência à corrosão do ferro fundido, tornando-o adequado para uso em ambientes adversos. Essa resistência é especialmente importante em aplicações em que há exposição a umidade, produtos químicos ou outros agentes corrosivos (FRANZEN et al., 2020).

Ferros fundidos com perlita são mais fáceis de usar do que aqueles com outras microestruturas, como a grafita esferoidal. Isso facilita a fabricação de peças complexas e precisas, reduzindo os custos de produção e o tempo de usinagem.

A presença de perlita melhora a capacidade do ferro fundido de resistir ao desgaste, tornando-o adequado para aplicações que envolvem atrito constante, como engrenagens, cilindros, rolos e outras peças sujeitas a desgaste. A perlita ainda contribui para a estabilidade dimensional do ferro fundido, minimizando deformações e mudanças nas dimensões das peças durante o resfriamento e uso (COUTINHO et al., 2015).

Por fim, vale destacar que a formação de perlita pode ser controlada e ajustada para atender requisitos específicos de diferentes aplicações.

### **5.1.3 Amostra 03**

Além da formação de grafita e perlita, a amostra 03 com percentual de adição de nióbio de 0,8% apresentou formação de ferrita (Figura 34). A formação de ferrita no ferro fundido cinzento oferece vários benefícios em termos de propriedades mecânicas e de usinagem. O ferro fundido cinzento contém uma matriz de grafita na forma de lamelas dispersas em uma matriz metálica.

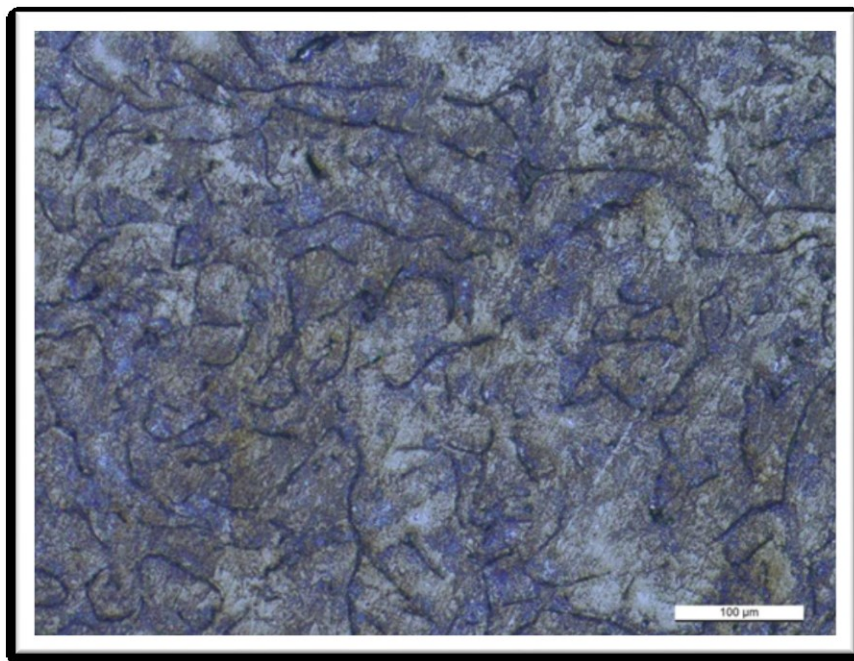
A presença de ferrita torna o ferro fundido cinzento mais maleável e, portanto, mais fácil de ser usinado. Isto é importante em aplicações que envolvem operações de usinagem como torneamento, fresamento e furação (COUTINHO et al., 2015).

A ferrita possui também uma maior resistência à corrosão do que a matriz perlítica típica do ferro fundido cinzento. Isto torna o material mais adequado para



aplicações em ambientes corrosivos, como componentes em contato com água ou substâncias químicas corrosivas. A ductilidade aprimorada é outra característica de material que possui ferrita, o que torna o material estudado menos frágil, aumentando sua capacidade de absorção de choque e resistência a trincas

**Figura 34-** Amostra 03 (0,8% Nb)



**Fonte:** Autor, 2024

A presença de ferrita no material também pode melhorar a resistência à fadiga do ferro fundido cinzento, o que o torna mais adequado para aplicações em que ocorrem ciclos repetidos de carga. A amostra estudada possui elevadas condutividades térmica e elétrica, o que pode ser benéfico em aplicações que requerem boa dissipação de calor (COUTINHO et al., 2015).



## 5.2 ENSAIO DE USINABILIDADE

### 5.2.1 Desgaste de flanco da ferramenta

A utilização de parâmetros de fim de vida da ferramenta de usinagem desempenha um papel crucial na garantia da eficiência, qualidade e segurança do processo. Este parâmetro se refere ao momento em que uma ferramenta de corte atinge o limite de sua vida e deve ser substituída (MALAYATH; MOTE, 2022).

Para serem obtidos os valores de desgaste de flanco (VB) do inserto foi realizado um ensaio com a finalidade de fazer uma análise de vida da ferramenta para o lingote de 230 x 70 x 30 mm de ferro fundido contendo 0,8% Nb. Para este ensaio foi utilizado um cabeçote de fresamento de 80 mm de diâmetro (para quatro insertos) marca Vertex, modelo TP-80 (VITOR & BUONO, 2024) (Figura 35). Para este ensaio foram realizados 10 passes mantendo-se os mesmos parâmetros de usinagem para cada passe (o comprimento de cada passada é igual ao comprimento da peça, isto é, 230 mm). Ao final destes, os insertos (cada um contendo 8 arestas) foram retirados e analisados por meio do microscópio eletrônico de varredura.

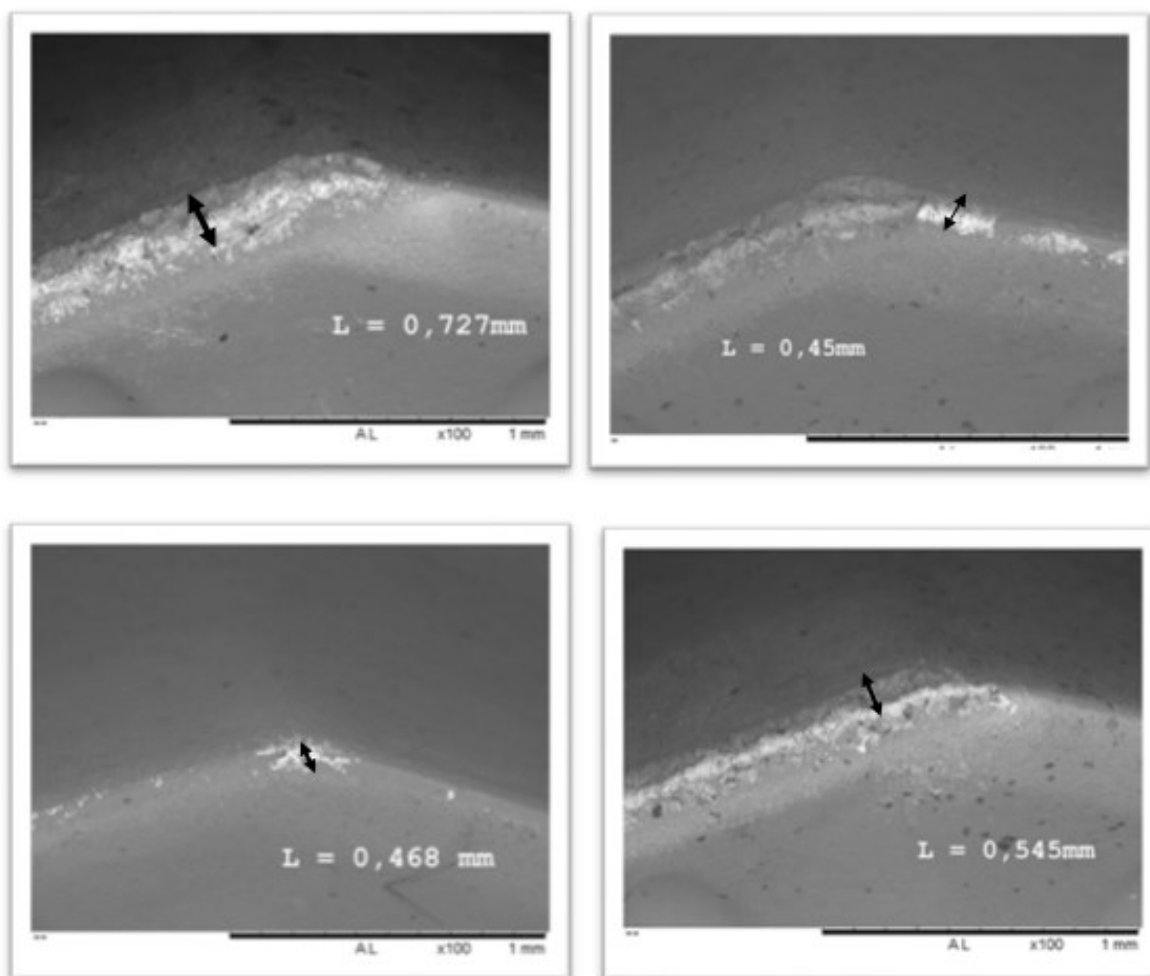
**Figura 35-** Cabeçote de fresamento utilizado nos ensaios



Fonte: Vitor & Buono (2024).

Na Figura 36 pode-se observar os desgastes de flanco (representados por L) em cada uma das arestas dos insertos utilizados nos ensaios, e que foram visualizados por meio de microscópio eletrônico de varredura, indicando que o inserto ultrapassou o critério de fim de vida adotado ( $VB = 0,3 \text{ mm}$ ).

**Figura 36-** Imagens dos insertos (MEV) mostrando o desgaste de flanco em diferentes insertos



Fonte: Autor, 2024

A utilização de ferramentas de corte desgastadas, em particular aquelas com desgaste de flanco significativo, é um problema recorrente na indústria de usinagem (MARTIN, 2015; WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002). Esse desgaste pode ocorrer devido a diversos fatores, como a natureza do material a ser usinado, a

velocidade de corte, refrigeração inadequada e a qualidade da ferramenta utilizada. O desgaste de flanco médio encontrado neste estudo foi  $VB = 0,548$  mm.

O desgaste de flanco em uma ferramenta de corte impacta negativamente a qualidade do processo de usinagem e, conseqüentemente, a qualidade das peças produzidas. Vários problemas estão associados a esse tipo de desgaste, incluindo o aumento da força de corte necessária, a geração de calor excessivo e a deterioração da precisão dimensional das peças usinadas. Além disso, o desgaste de flanco da ferramenta pode resultar em acabamentos de superfície inadequados e em um aumento no consumo de energia (CHENG et al., 2017).

Diante desse cenário, é fundamental adotar medidas preventivas e corretivas. Em primeiro lugar, deve-se realizar uma manutenção regular das ferramentas de corte, incluindo a substituição das ferramentas desgastadas. A manutenção preditiva, que se baseia no monitoramento do desgaste e no uso de tecnologias de medição avançadas, pode ajudar a identificar o momento certo para a troca da ferramenta, evitando desperdícios (GARCIA, 2014).

Além disso, a escolha da ferramenta adequada para cada tipo de processo de usinagem e material é essencial. Ferramentas de alta qualidade e revestidas podem aumentar a resistência ao desgaste e prolongar a vida das ferramentas (SIGNORELLI et al., 2022).

Outro aspecto importante é otimizar os parâmetros de corte, como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte. Isso pode contribuir para reduzir o desgaste da ferramenta e melhorar a eficiência do processo (CHENG et al., 2017).

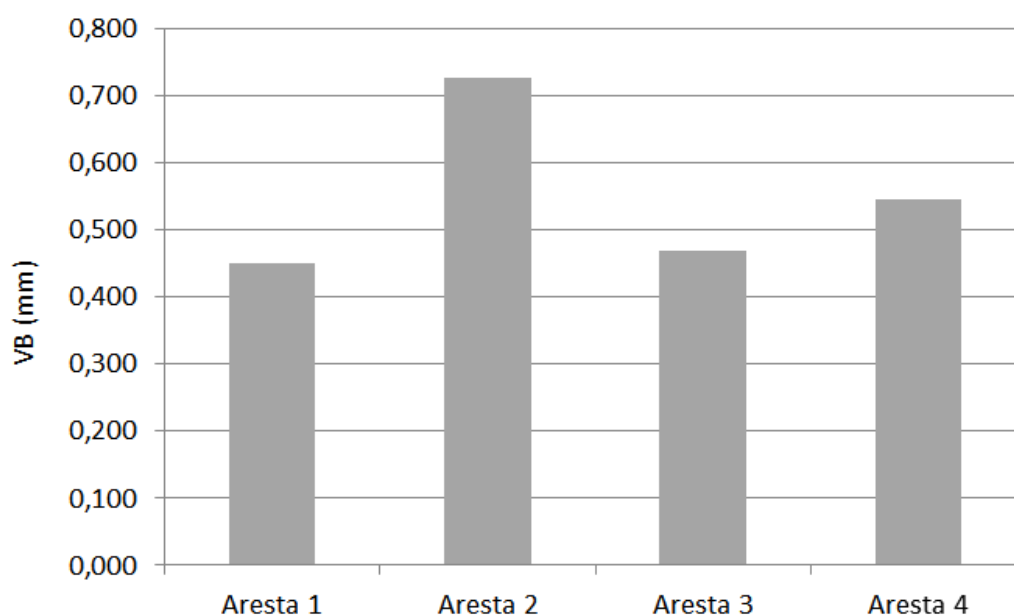
Por fim, é crucial investir em treinamento para operadores de máquinas e técnicos de usinagem, a fim de que eles possam identificar o desgaste da ferramenta a tempo, e tomar as medidas necessárias.

Bordas desgastadas como mostra a Figura 36, ou quebradas, podem resultar em peças com dimensões imprecisas, acabamento superficial ruim e tolerâncias fora de especificação.

Os valores encontrados neste estudo se assemelham a outros estudos encontrados na literatura (MARTIN, 2015), sendo que estes valores atestam que a ferramenta, ao entrar em contato com o material fundido usado neste estudo, apresenta boas condições operacionais, o que proporciona mais consistentes taxas

de remoção de material, o que conduz ao aumento da produtividade. A Figura 37 apresenta o valor de vida obtido para cada aresta do inserto.

**Figura 37-** Valores de desgastes VB para a aresta usada de cada inserto (mm)



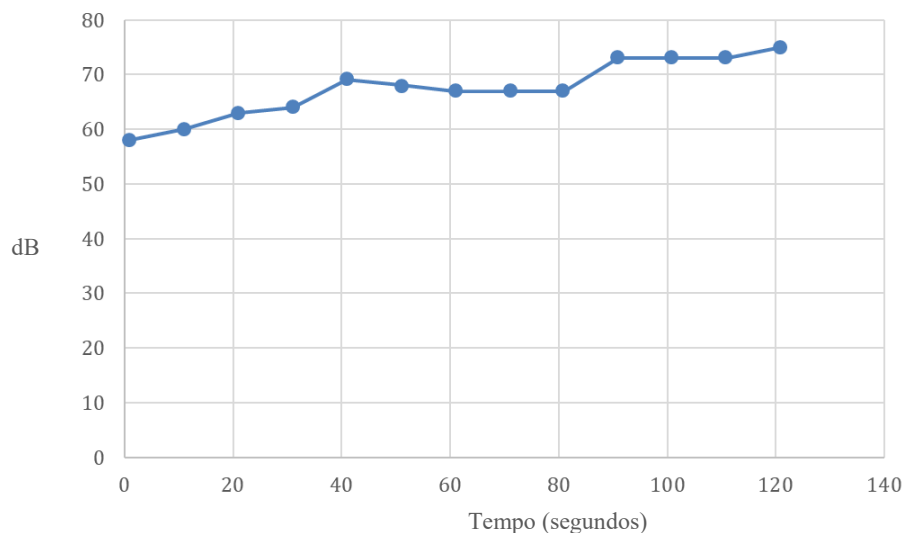
Fonte: Autor, 2024.

No ensaio realizado, após 10 passes, e com o desgaste encontrado em cada aresta (Figura 37), pode-se observar que a ferramenta apresentou valores de desgaste nas quatro arestas acima do valor adotado para fim de vida da ferramenta. No entanto, do ponto de vista da preservação do meio ambiente, buscando-se prolongar a sua vida, pode-se considerar continuar utilizando tal ferramenta após efetuar afiação (CONRADIE et al., 2017).

### 5.2.2 Resultados para os níveis de ruídos

Para o ensaio de níveis de ruídos sonoros, foi realizado na mesma fresadora convencional, 10 passadas da ferramenta de corte sobre o ferro fundido com 0,8% de nióbio, paralelamente o sonômetro utilizado foi posicionado constantemente durante todo o ensaio próximo ao ouvido do operador. A Figura 38 mostra os resultados encontrados.

**Figura 38-** Nível de pressão sonora sobre o operador durante 120 segundos no fresamento (dB X tempo em segundos)



**Fonte:** Autor, 2024.

Observou-se durante o ensaio realizado que os valores de nível de ruído mantiveram-se aproximadamente constantes, com média de 67,4 dB. A pressão sonora no fresamento é principalmente causada pela interação entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho, resultando em vibrações e ruídos. Esses sons podem atingir níveis que, se não controlados adequadamente, podem levar a problemas de saúde auditiva em longo prazo para os trabalhadores expostos. Portanto, é essencial definir e monitorar limites seguros de pressão sonora no fresamento.

Além dos aspectos de segurança auditiva, a redução do nível de pressão sonora na usinagem pode ter benefícios adicionais, como melhorar as condições de trabalho e aumentar a eficiência da produção.

Em resumo, o limite de pressão sonora no fresamento é uma consideração crucial para garantir a segurança e o bem-estar dos trabalhadores, além de cumprir as normas regulamentares. A inovação contínua na concepção de máquinas-ferramenta e a implementação de práticas seguras são fundamentais para minimizar os impactos negativos do ruído associado ao fresamento.

### 5.2.3 Resultados para acabamento superficial

Para a rugosidade média ( $R_a$ ), foi realizado ensaio sobre o ferro fundido cinzento com percentuais de 0,2, 0,6 e 0,8% de nióbio, após a realização do ensaio de fresamento (Tabela 3).

Os valores que foram encontrados no ensaio de rugosidade para as diferentes amostras mostram-se muito próximos uns dos outros, independente da variação de percentual do material inoculados. Valores baixos de rugosidade mostram uma superfície mais suave e uniforme, já os valores elevados indicam uma superfície mais áspera e irregular.

**Tabela 3-** Rugosidade das amostras ( $\mu\text{m}$ )

Porcentagem de Nióbio	Rugosidade média $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
0,20%	0,786
0,60%	0,8
0,80%	0,879

**Fonte:** Autor, 2024.

A interpretação dos valores de rugosidade depende do modelo de aplicação. Existem alguns casos em que uma superfície mais suave pode ser desejada por razões estéticas, para reduzir o atrito ou facilitar a limpeza. Já em outros casos, uma superfície mais áspera pode ser preferida para melhorar a aderência em determinadas aplicações, como no caso de peças mecânicas (MARTIN, 2015).

Sendo assim, a avaliação dos valores de rugosidade deve ser feita de modo que se considerem os requisitos específicos da aplicação em questão. Alguns padrões de qualidade ou especificações técnicas podem ser definidos limites ou faixas aceitáveis para os valores de rugosidade, dependendo do uso pretendido do material ou da peça.

### 5.3 RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)

Os resultados encontrados na análise de ciclo de vida apresentam um avanço em termos de sustentabilidade, mas também destaca a importância da mineração urbana na economia circular. Conforme mencionado anteriormente, a originalidade

desta pesquisa reside na aplicação da ACV a um processo de fundição que incorpora materiais reciclados, mantendo o material fundido final com as mesmas características de um material fabricado com insumos novos, contribuindo para a abordagem emergente da mineração urbana.

A utilização dos métodos CML e RECIPE (descritos nas seções 2.2.2 e 2.2.3 respectivamente) permitiu uma análise abrangente dos impactos ambientais do processo de fundição, cada método com suas particularidades, mas considerando fatores como o consumo de energia, as emissões de gases de efeito estufa e a geração de resíduos. Os resultados que serão apresentados nas próximas seções indicam os benefícios ambientais associados à utilização de material reciclado, mostrando reduções significativas nos impactos em comparação com processos convencionais.

### **5.3.1 Resultados usando-se o CML**

São apresentados nesta seção os resultados encontrados na análise de ciclo de vida do processo de fundição para o processo realizado com material novo (Tabela 4) e nas demais seções com material reciclado. Para a determinação destes resultados utilizou-se o software OpenLCA e, nesta etapa, o método CML.

#### *5.3.1.1 Depleção abiótica*

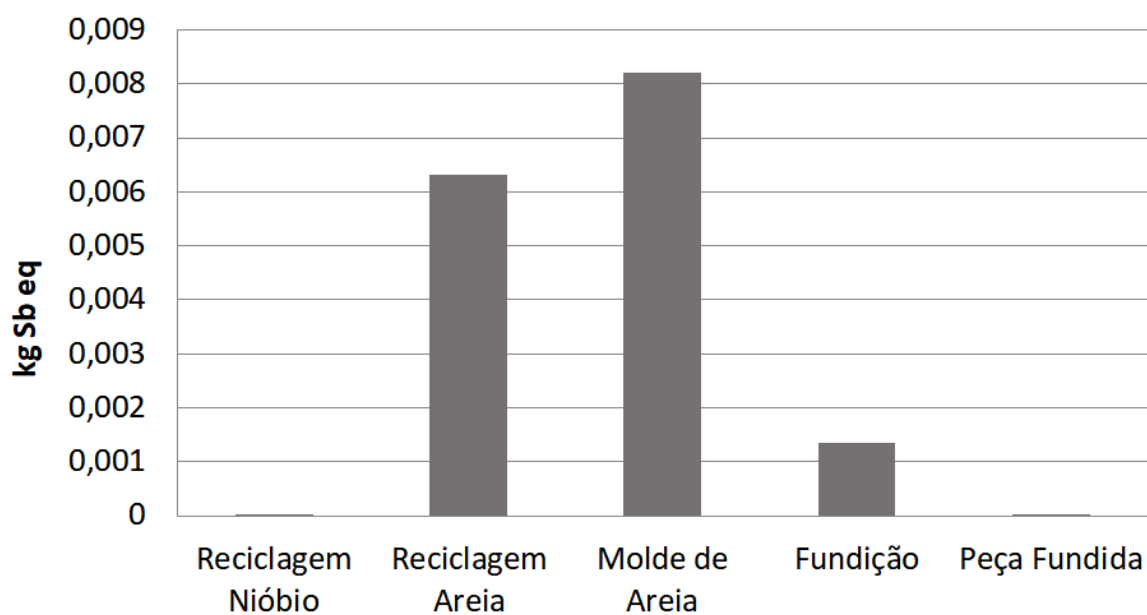
O esgotamento abiótico é a categoria de impacto que se refere ao esgotamento de recursos (YILMAZ et al., 2015), tais como combustíveis fósseis, minerais, metais, argila e turfa (MANCINI et al., 2015). Os resultados obtidos para a depleção abiótica são mostrados na Figura 39.

As etapas de reciclagem de areia e preparação de moldes de areia mostrou um maior valor de impacto entre 0,006 a 0,008 kg antimônio equivalente. Têm-se também, os insumos do transporte que contribuem de forma significativa para o resultado obtido, uma vez que o transporte utiliza combustíveis fósseis.

**Tabela 4-** Impactos resultantes do processo usando-se material novo

Impacto	Unidade	Molde de areia (nova)	Fundição (nova)	Peça fundida (nova)	Resultado final
Depleção abiótica	kg Sb eq	0,009216742	0,0019789	0,00579815	0,016993792
Acidificação	kg SO <sub>2</sub> eq	0,19919	0,035758	0,020384	0,255332
Eutrofização	kg PO <sub>4</sub> --- eq	0,18794	5,30036	0,09929	5,58759
Ecotoxicidade aquática	kg 1,4-DB eq	0,796488	0,18501	0,09841	1,079908
Aquecimento global (GWP100a)	kg CO <sub>2</sub> eq	2,998	2,003	0,2856	5,2866
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	3,0088	2,073	0,515623	5,597423
Esgotamento da camada de ozônio (ODP)	kg CFC-11 eq	6,27E-15	1,53E-08	1,22E-08	2,75E-08
Oxidação fotoquímica	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0,00062292	0,0069979	0,0006266	0,00824742
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	0,358916206	0,05203	0.0406	0,410946206

Fonte: Autor, 2024.

**Figura 39-** Resultado para depleção abiótica em kg antimônio equivalente

Fonte: Autor, 2024.



A depleção abiótica nos meios de transporte ocorre pelo uso intensivo e nada sustentável de recursos naturais não renováveis, como por exemplo os combustíveis fósseis e minerais, que são importantes para o funcionamento desses meios.

A maioria dos meios de transporte como automóveis, caminhões, aviões e navios, necessitam de combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e também carvão. Todos estes recursos estão sendo esgotados em um ritmo do qual podem ser inevitavelmente regenerados, e é este consumo contínuo que leva a depleção abiótica (FARIAS et al., 2021).

A indústria do transporte, também necessita de uma grande quantidade de minerais não renováveis, como, por exemplo, ferro, alumínio e cobre para a manufatura de veículos, componentes, etc. E a extração não sustentável desses minerais também pode causar o esgotamento de depósitos naturais e contribuir para escassez de recursos (FARIAS et al., 2021).

Sendo assim, a depleção abiótica dos recursos utilizados nos meios de transporte resulta em escassez crescente desses recursos. Se há uma demanda que supera a capacidade de reposição natural, os preços desses recursos naturalmente tendem a aumentar, fazendo que estes recursos sejam inacessíveis para muitas pessoas. Isso pode levar a conflitos, competição e desigualdade na distribuição desses recursos.

O uso excessivo de combustíveis nos meios de transporte causa impactos ambientais significativos, como por exemplo, a queima de combustíveis fósseis que libera gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A extração de minerais por meio da mineração pode causar degradação do solo, poluição da água e perda de biodiversidade (ZHELEZNY et al., 2021).

Nos meios de transporte a depleção abiótica mostra a extrema necessidade de fazer a transição para fontes de energia renováveis e materiais sustentáveis. Incluindo investimentos em tecnologias novas e eficiente, como carros elétricos e híbridos, além de desenvolvimento em infraestrutura para energia limpa (DA SILVA et al., 2023).

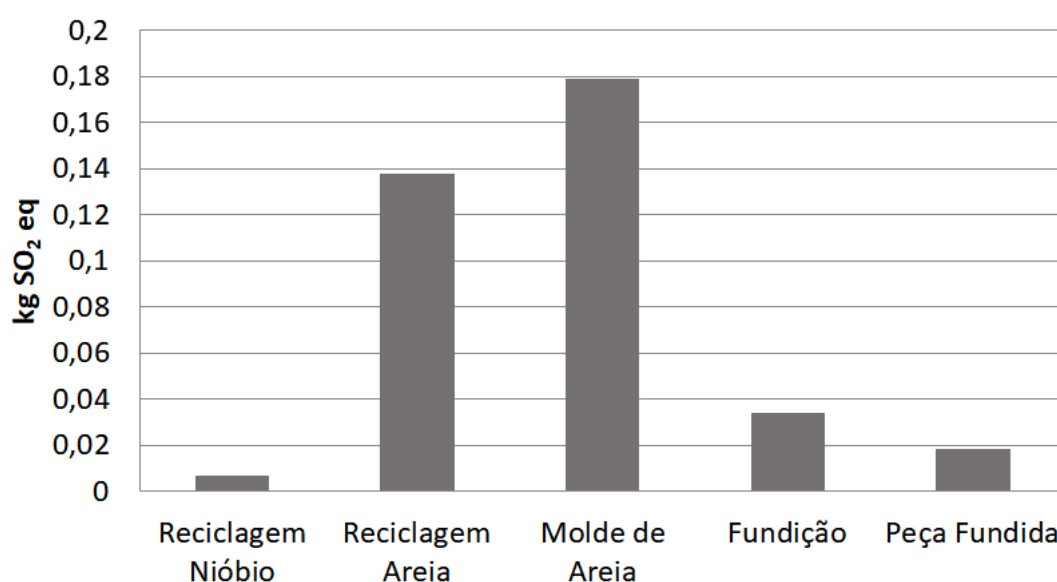
No contexto de meios de transporte deve haver preocupação com a depleção abiótica devido ao consumo insustentável de recursos não renováveis, como combustíveis fósseis e minerais. Faz-se necessário buscar soluções alternativas

sustentáveis visando reduzir a dependência desses recursos, de maneira a reduzir os impactos negativos no meio ambiente (ZHELEZNY et al., 2021).

### 5.3.1.2 Acidificação

A acidificação está relacionada com a diminuição do pH dos oceanos causada principalmente pelo aumento do CO<sub>2</sub> (YOOL et al., 2013). Os processos que emitem gases provavelmente terão um alto valor de impacto nesta categoria. A Figura 40 apresenta os resultados obtidos para acidificação.

**Figura 40-** Resultado para o impacto de acidificação em kg SO<sub>2</sub> equivalente



Fonte: Autor, 2024

A acidificação é um processo em que a acidez aumenta em corpos de água, como por exemplo, lagos e rios, e este fenômeno se deve a absorção de dióxido de carbono da atmosfera. Pode-se dizer também que é uma consequência direta da queima de combustíveis fósseis, como, por exemplo, o carvão, petróleo e o gás natural, que naturalmente liberam quantidades significativas de CO<sub>2</sub> na atmosfera (DONEY et al., 2007).

Dentro da acidificação, existem os meios de transporte que possuem um papel significativo, que se deve à queima de combustíveis fósseis nos motores de veículos. Afinal, carros, caminhões, navios e aviões são fontes significativas de emissões de CO<sub>2</sub>, o que fatalmente contribui para a elevação dos níveis de acidez na atmosfera.

Vale ressaltar que dentro dos meios de transporte os impactos da acidificação são diversos. No transporte rodoviário utilizado para o transporte dos insumos utilizados neste estudo a queima de combustíveis fósseis em veículos automotores emite CO<sub>2</sub> na atmosfera, que se dissolve na água da chuva, formando ácido carbônico. Essa água ácida pode corroer a infraestrutura das estradas, como pontes e túneis, exigindo mais gastos em manutenção e reparos (CALDEIRA; WICKETT, 2003).

O processo de reciclagem do nióbio com resultado próximo a 0,02 kg SO<sub>2</sub> equivalente, ocorre a partir do transporte da sucata do nióbio até a empresa que realiza o processo de fusão. Com o auxílio de um equipamento que possui sensores eletromagnéticos, estes materiais são avaliados e separados, deve-se levar em consideração que nesta etapa ocorre consumo de energia mediante a operação do equipamento.

No entanto as fases de impacto que envolvem a presença de areia, água, ligante e transporte tem um impacto maior. No processo de desmoldagem da areia, depois de ser utilizada na fundição, se encontra material particulado e escória, que são advindos da liga metálica.

A liga tem energia como fonte de ativação, resultando em emissões que contribuem significativamente para a geração de CO<sub>2</sub>. Vale lembrar que a fase de transporte desses materiais impacta no valor de acidificação e, conseqüentemente, etapas de transporte se somam a esse valor, como é o caso da fundição da liga base.

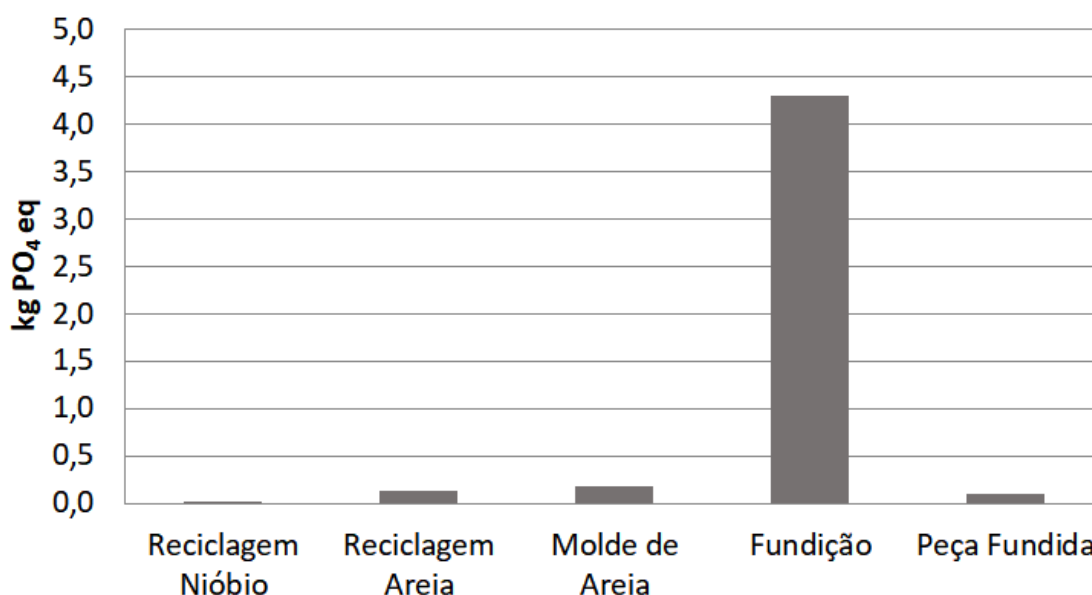
#### *5.3.1.3 Eutrofização*

A eutrofização reduz a qualidade dos recursos hídricos devido à diminuição do oxigênio dissolvido causada por um crescimento significativo de plantas aquáticas impulsionado por um aumento de nutrientes, principalmente fósforo e

nitrogênio (CHISLOCK et al., 2013). A Figura 41 apresenta o resultado do impacto da eutrofização.

Considerada um fenômeno ambiental que ocorre devido a um excesso de nutriente, como por exemplo, o nitrogênio e fósforo, encontrados em corpos de água (rios, lagos e mares) a eutrofização é um impacto ambiental que pode ocasionar um desequilíbrio ambiental de grande proporção. Os nutrientes encontrados em excesso nestes corpos de água podem estimular o crescimento excessivo de algas e outras plantas aquáticas (ANDERSON et al., 2021).

**Figura 41-** Resultado para eutrofização em kg PO<sub>4</sub> equivalente



Fonte: Autor, 2024.

Na fundição, que obteve o maior impacto em próximo de 4,5 kg PO<sub>4</sub> equivalente, a eutrofização ocorre devido à liberação de efluentes e resíduos que possuem altas concentrações de compostos químicos, como óleos, metais pesados e substâncias tóxicas. Tais compostos podem ser advindos de diversas fontes, como por exemplos produtos químicos, matéria orgânicas, águas residuais e até mesmo as escórias geradas pelo processo de fundição.

No momento em que estes resíduos são liberados, muitas vezes diretamente nos corpos d'água, eles podem causar muitos impactos negativos. Uma destas

consequências é o aumento da carga de nutrientes na água, como o nitrogênio e também o fósforo que contribuem para os crescimentos de algas. Sendo assim, tem-se que o aumento destes nutrientes estimula o florescimento de modo excessivo de algas, formando manchas verdes ou azuladas na superfície da água (ANDERSON et al., 2021).

Conforme as algas proliferam, elas acabam bloqueando a luz solar que atinge a parte mais profunda da água, o que reduz a disponibilidade de luz para todas aquelas plantas denominadas subaquáticas e, de certo modo, afeta negativamente a fotossíntese. Também é importante ressaltar que as algas morrem e se decompõem, e são os microrganismos que são os responsáveis pelos processos de decomposição, consumindo para isto uma grande quantidade de oxigênio dissolvido na água, todo este processo acaba diminuindo consideravelmente os níveis de oxigênio disponível (FANG et al., 2022).

Ainda sobre a redução de oxigênio, é importante dizer que este fenômeno é de todo modo prejudicial para vida aquática, devido à necessidade que muitas espécies têm de oxigênio, em que sua escassez pode levar a morte de diversas espécies, como peixes, crustáceos e outras espécies, resultando conseqüentemente em um desequilíbrio na cadeia alimentar e também na biodiversidade.

O consumo de água pelos seres humanos também pode ser afetado, isto porque a presença de algas e a formação de cianobactérias tóxicas geram toxinas consideradas prejudiciais à saúde humana e também afetando peixes, crustáceos e diversos outros organismos que servem como fonte de alimentos para os seres humanos (FANG et al., 2022).

Sendo assim, é essencial implementar medidas de controle de poluição e também gestão adequada de resíduos para prevenir ou minimizar a eutrofização no processo de fundição. Incluindo a adoção de tecnologias mais limpas e também a implementação de sistemas de tratamentos, estabelecimento de práticas de reciclagem e reutilização de materiais.

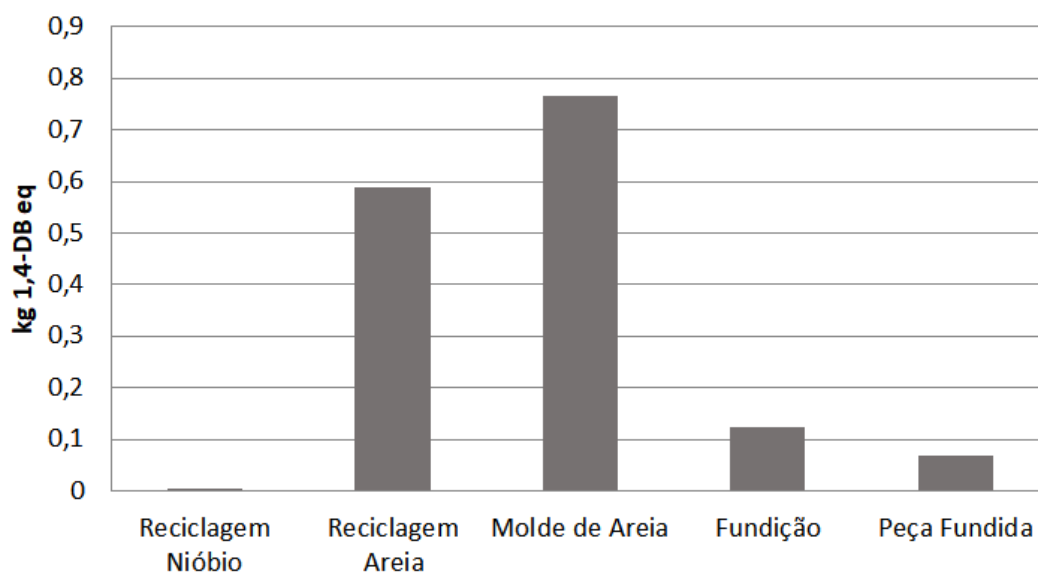
O uso de água nos processos de fabricação é significativo, seja como parte da matéria-prima necessária para a fabricação dos produtos ou nas etapas de fabricação. Na fundição, a água desempenha um papel fundamental no resfriamento dos produtos fundidos e na composição da mistura de areia para fabricação dos moldes.

Observa-se que o uso de água após o processo, que provoca a eutrofização, ocorre de forma mais significativa na etapa de fundição da liga e das peças, que inclui o resfriamento dos lingotes. Por sua vez, no preparo da areia para fabricação dos moldes, observa-se absorção de água, não sendo necessário descartar a água utilizada nesta etapa. Deve-se notar que qualquer forma inadequada de disposição de resíduos nos recursos hídricos pode causar eutrofização.

#### 5.3.1.4 Ecotoxicidade em água doce

A ecotoxicidade em água doce é a ação nociva de substâncias sobre a fauna e a flora em ambientes de água doce (LUNARDI et al., 2018). A Figura 42 apresenta os resultados encontrados para ecotoxicidade.

**Figura 42-** Resultado para o impacto de ecotoxicidade da água doce em kg 1,4-DB (diclorobenzeno) equivalente.



Fonte: Autor, 2024

A ecotoxicidade da água doce na fundição é um assunto de muita importância ambiental e também de saúde pública. Uma vez que a atividade de fundição envolve a fusão de metais, como ferro, alumínio e cobre, para a fabricação de diversos produtos. No entanto, sabe-se que esse processo pode gerar uma série de

substâncias consideradas químicas e tóxicas com potencial de afetar negativamente os ecossistemas aquáticos.

O metal pesado (chumbo, mercúrio, cádmio e zinco) é um dos principais poluentes liberados durante o processo de fundição. É na produção de ligas metálicas que estes metais são liberados, principalmente durante o processo de fusão. Ocorre que, quando essas substâncias são lançadas em água doce, os organismos aquáticos presentes podem sofrer diversos danos, comprometendo seu desenvolvimento, sua reprodução e até mesmo sua sobrevivência (TAYLOR et al., 2023).

Esses metais possuem uma toxicidade capaz de se acumular nos tecidos dos organismos vivos durante muito tempo. Pode-se citar como exemplo os peixes, que são expostos a consideráveis concentrações de mercúrio, podendo acumular em seus tecidos musculares, o que conseqüentemente se torna perigoso para consumo humano. Os metais pesados também são perigosos no que se refere aos organismos aquáticos que vivem em níveis mais baixos de exposição, isto porque estes metais podem causar distúrbios fisiológicos, como danos ao sistema nervoso, comprometimento do sistema imunológico e também problemas hormonais (MOSCHEM; GONÇALVES, 2020).

Alguns outros poluentes liberados durante o processo de fundição, são os chamados compostos orgânicos voláteis (COVs) e, ainda, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), tratam de produtos químicos e orgânicos advindos da queima de combustíveis fósseis e variados processos industriais. São consideradas substâncias tóxicas e persistentes no meio aquático porque afeta a vida aquática, podendo ocasionar mutações genéticas e câncer em organismos (DELORENZO; KIMBROUGH, 1998).

Resíduos sólidos, como escórias e cinzas que também são oriundos do processo de fundição podem gerar e conter metais pesados ou outros tipos de produtos químicos e tóxicos e o descarte de forma incorreta destes resíduos podem gerar contaminação do solo e também da água subterrânea.

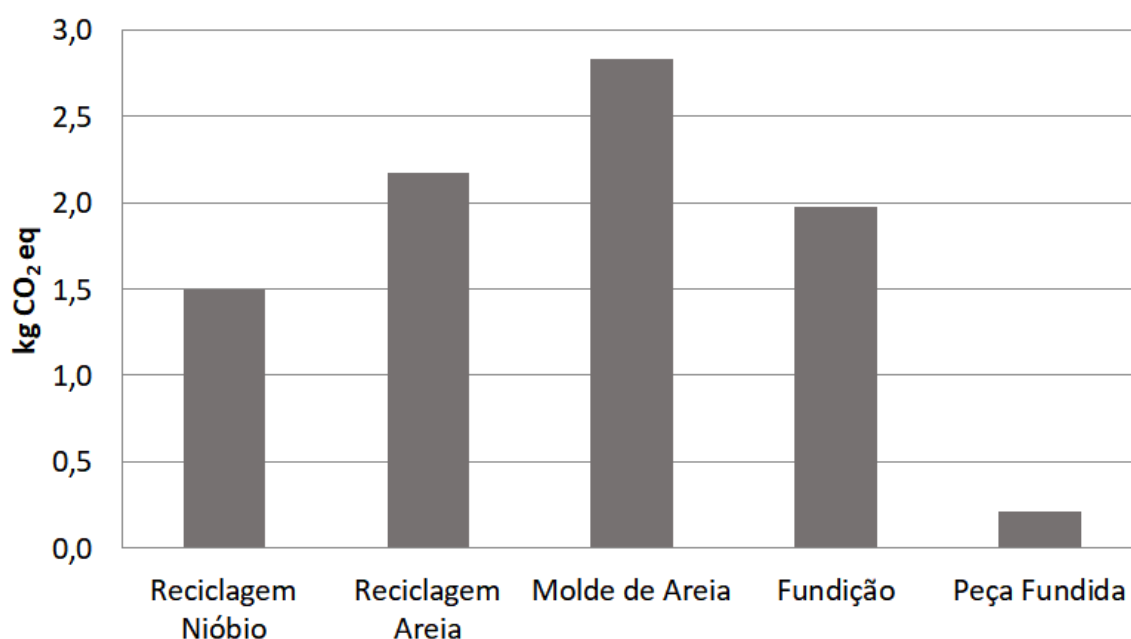
Para minimizar a ecotoxicidade da água do no processo de fundição, se faz necessário a adoção de gestão ambiental por parte das empresas, incluindo nesta gestão o tratamento de efluentes e também a implementação de medidas de prevenção de poluição com a adoção de práticas de produção mais limpa, passando

pela adoção de processos de reciclagem e também a conscientização dos trabalhadores.

### 5.3.1.5 Aquecimento Global

O aquecimento global pode ser definido como o aumento da temperatura média global da superfície terrestre (DE SOUSA, 2019). Uma das principais causas do aquecimento global é o efeito estufa, que ocorre por meio da emissão de gases na atmosfera que, por sua vez, retém o calor emitido pelo sol na superfície terrestre, aumentando a temperatura (HERTZBERG et al., 2017). Os resultados encontrados para o aquecimento global são mostrados na Figura 43.

**Figura 43-** Resultado para o impacto de aquecimento global em kg CO<sub>2</sub> equivalente



Fonte: Autor, 2024

Como um processo de fabricação que envolve diversas fases, o processo de fundição embora seja essencial para fabricação de um mix de produtos, possui diversos impactos ambientais significativos, incluindo o talvez mais popularmente conhecido, o aquecimento global. Existem vários efeitos da fundição que contribuem



para o aquecimento global:

- Emissões de gases de efeito estufa: é durante o processo de fundição, que são liberados gases de efeito estufa, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ). De modo geral, estes gases contribuem para o aumento do efeito estufa, que resulta no aquecimento da atmosfera da Terra (XIONG; DU, 2020).
- Consumo de energia: A fundição é um processo de fabricação que tem necessidade de uma quantidade significativa de energia, sendo que a maior parte desta energia advém de combustíveis fósseis que são fontes intensivas de emissões de  $\text{CO}_2$ .
- Uso de materiais e recursos naturais: Os recursos naturais consumidos pela fundição são diversos, incluindo os minerais metálicos, água e combustíveis fósseis. A extração desses recursos e o processamento subsequente têm impactos ambientais altamente negativos, como a degradação do solo, a contaminação da água e a perda da biodiversidade.
- Descarte de resíduos e poluição do ar e da água: A geração de resíduos sólidos e líquidos são altamente poluentes e tóxicos. Nestes resíduos são encontrados metais pesados e também substâncias químicas tóxicas que podem prejudicar e contaminar, água, solo e também fontes de água (XIONG; DU, 2020).

Na reciclagem do Nióbio com impacto no valor de 1,5 kg  $\text{CO}_2$  equivalente, o material é transportado da empresa fornecedora até a fábrica por meio de transporte movido com combustível fóssil, e os processos subsequentes também emitem gases durante suas operações.

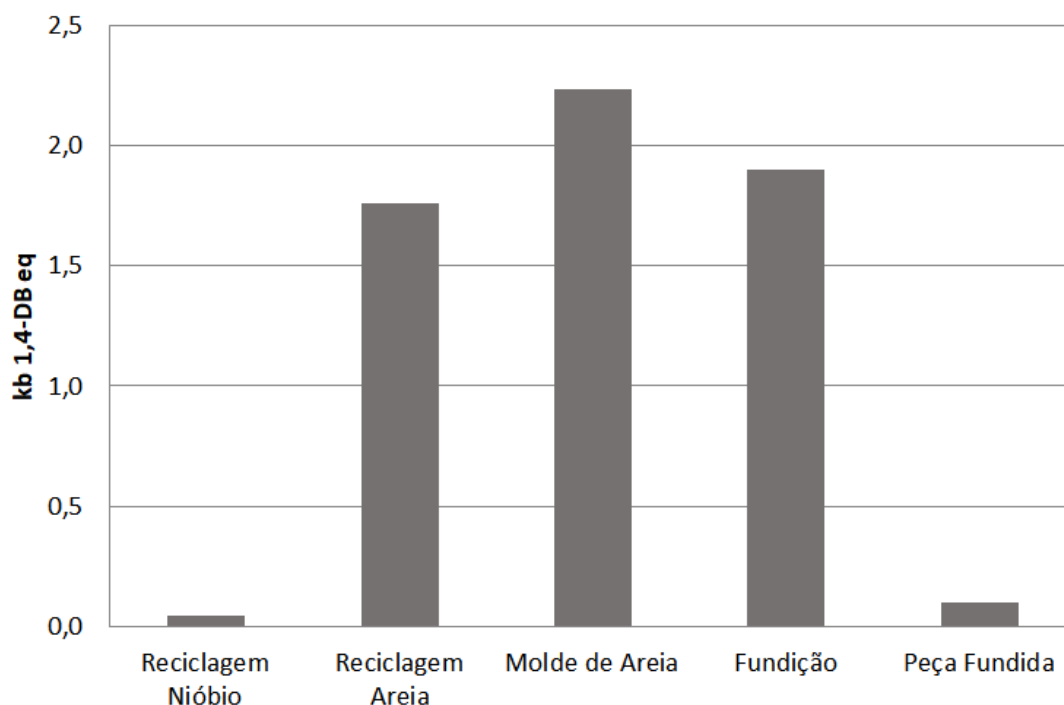
A Figura 43 mostra um valor maior para o processo de moldagem com areia reciclada, o que pode justificar a utilização de areia nova como parte da técnica de reaproveitamento de areia de fundição. A mistura de areia reciclada e areia nova busca atingir as propriedades mecânicas desejadas para a areia que contribuem para um molde de boa qualidade. A etapa de preparação da liga tem um dos menores valores para esse impacto, mesmo gerando gases e material particulado.

#### *5.3.1.6 Toxicidade humana*

A toxicidade humana é a capacidade inerente e potencial da substância tóxica de causar efeitos nocivos aos seres humanos. O efeito tóxico é geralmente

proporcional à concentração da substância no corpo da pessoa (por exemplo, pele) (ETTRUP et al., 2017). A Figura 44 mostra os valores de impacto para toxicidade humana.

**Figura 44-** Resultado para o impacto de toxicidade humana em kg 1,4-DB (diclorobenzeno) equivalente



Fonte: Autor, 2024

Um dos principais perigos associados à fundição é a exposição a metais pesados. Durante a fusão de ligas metálicas em fundição estas substâncias podem ser aspiradas, podendo prejudicar significativamente os seres humanos. A exposição crônica a tais metais pode induzir distúrbios neurológicos, doenças nos rins, problemas no sistema cardiovascular e até mesmo câncer (HARVEY et al., 1998).

Com os metais pesados, as fundições podem ainda liberar substâncias químicas voláteis, como COVs (compostos orgânicos voláteis) que são tóxicas para as pessoas, causando irritações respiratórias agudas, problemas no sistema neuronal central e, nos casos mais graves, até mesmo câncer.

Os trabalhadores podem estar recebendo cargas tóxicas mais pesadas por estarem expostos, principalmente durante a fusão do metal. Durante este processo, eles suportam fumos, poeiras e partículas extremamente tóxicas.

No entanto, em termos de toxicidade humana, estes efeitos não se limitam apenas aos trabalhadores, deve-se considerar também que nas áreas em que as fundições estão situadas, as comunidades próximas podem sofrer com as emissões tóxicas, gerando danos significativos à saúde humana para pessoas que vivem nas proximidades, em particular crianças (HARVEY et al., 1998).

Apesar do impacto ambiental da produção de nióbio ser relativamente pequeno, o risco começa na origem com a separação e triagem do material. Um risco nesta fase é a proximidade com material tóxico ou a interação direta com o nióbio.

A qualidade da areia e a quantidade de ligante utilizado para a produção de moldes justificam os resultados obtidos nesta fase: Neste estudo usa-se areia reciclada para fazer moldes, mas ainda havia areia nova.

O ciclo da fundição em si contém fatores que o desfavorecem, como a liberação de gases tóxicos e partículas.

#### *5.3.1.7 Depleção da camada de ozônio*

A camada de ozônio é uma parte da atmosfera com grande concentração de ozônio ( $O_3$ ), e tem um papel muito importante na filtragem dos raios ultravioleta advindos do sol (DA SILVA et al., 2023). Os valores das etapas do processo de fundição contribuem para a depleção da camada de ozônio, devido à elevada quantidade de emissões e, também, pela escória gerada no processo.

Substâncias químicas como clorofluorcarbonos (CFCs), halons, hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) e outros compostos correlatos, quando liberados na atmosfera, a partir da fabricação e uso de produtos que possuem estas substâncias tóxicas (MONKS et al., 2021), causam a redução da camada de ozônio.

CFCs e HCFCs são compostos químicos conhecidos especialmente por conterem cloro e bromo em sua composição. No momento em que estes compostos são liberados na atmosfera, eles sobem até a camada de ozônio, resultando em

átomos reativos de cloro e bromo que podem se ligar às moléculas de ozônio (MONKS et al., 2021).

A reação entre o cloro ou o bromo e o ozônio têm como resultado a quebra das moléculas de ozônio, que reduz a sua concentração na camada de ozônio. Essa depleção contínua do ozônio permite que uma quantidade maior de raios UV prejudiciais atinjam a superfície da Terra.

#### *5.3.1.8 Oxidação fotoquímica*

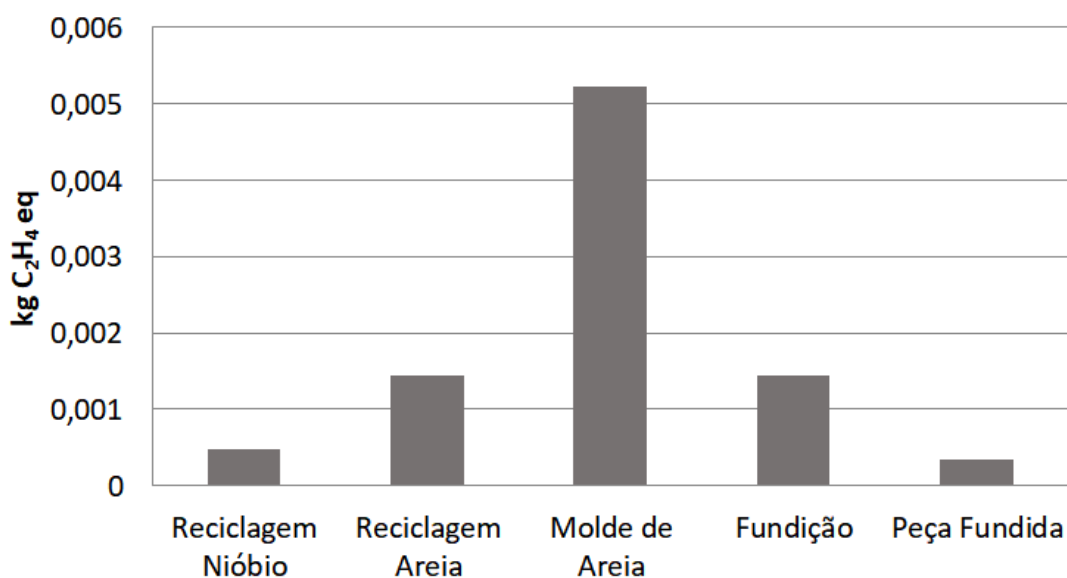
O ozônio ( $O_3$ ) na troposfera (aproximadamente 15 km de altitude) é causado por poluentes liberados na camada inferior da atmosfera, sendo considerado “ozônio ruim” devido aos seus efeitos adversos quando em contato com plantas e animais (MOHANAKUMAR, 2008). Deve-se destacar também que a presença de  $O_3$  afeta o crescimento natural das plantas, podendo reduzir a produtividade agrícola (CHAUDHARY; RATHORE, 2022).

A oxidação fotoquímica abrange substâncias que podem gerar a formação fotoquímica de ozônio (YAY, 2015), e também pode ser formada pela reação de compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio quando expostos à luz do sol e ao calor (ACERO et al., 2014).

Na Figura 45 pode-se observar os resultados do impacto da oxidação fotoquímica, sendo que o maior valor corresponde à etapa de fundição, que apresenta reduzida presença de materiais caracterizados por apresentarem alta pressão de vapor, fazendo com que se transformem em gás ao entrarem na atmosfera.

Como já citado anteriormente a oxidação fotoquímica ocorre a partir da reação de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e também dos chamados óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) quando expostos à luz solar. Vale lembrar que tais compostos são voluntariamente liberados no processo de fundição, oriundos de combustíveis fósseis (carvão e óleo), que geralmente são utilizados para gerar calor e também energia no processo de fusão do metal.

**Figura 45-** Resultado do impacto de oxidação fotoquímica em kg etileno ( $C_2H_4$ ) equivalente



Fonte: Autor, 2024

A fundição contribui para a oxidação fotoquímica no meio ambiente de algumas maneiras, como:

- Poluentes primários (emissões): No processo de fundição ocorre emissões diretas de poluentes primários (óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e compostos orgânicos voláteis (COVs). São estes poluentes que desencadeiam reações de oxidação fotoquímica quando liberados na atmosfera em contato com a luz solar (DENG et al., 2021).
- Poeira e partículas finas: Na geração e emissões de poeiras e partículas finas (metal, fuligem e material particulado), existe por parte destas emissões o papel de atuar como catalisadores para reações de oxidação fotoquímica. As partículas finas também aumentam a absorção de luz solar na atmosfera, o que contribui para a intensificação das reações fotoquímicas (RITZ et al., 2019).
- Emissões indiretas: Os poluentes primários e também as partículas finas interagem com alguns poluentes da atmosfera (óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), hidrocarbonetos. A partir destas interações ocorrem reações químicas e a formação de poluentes secundários, gerando ozônio troposférico ( $O_3$ ) e peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), por meio de processos de oxidação fotoquímica (RITZ et al., 2019).

Vale destacar que os efeitos oriundos da fundição na oxidação fotoquímica podem variar dependendo dos processos específicos utilizados e também das tecnologias de controle de emissões e regulamentações ambientais aplicadas.

#### 5.3.1.9 Ecotoxicologia terrestre

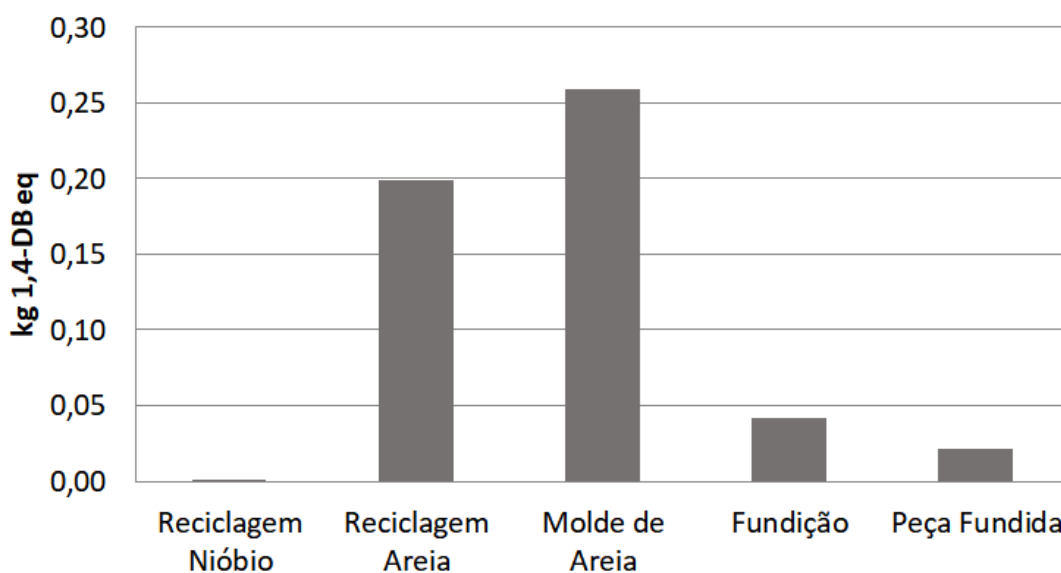
A ecotoxicologia terrestre se refere a um ramo da ecotoxicologia que estuda o ambiente terrestre e também utiliza ensaios ecotoxicológicos padronizados internacionalmente pela ISO (*International Organization for Standardization*) e pela OECD (*Organization for Economic Cooperation and Development*), nos quais espécies bioindicadoras (animais ou vegetais) são expostas a solos contaminados com o produto ou resíduo de interesse, com o intuito de qualificar e quantificar nestes organismos efeitos negativos (SERAFINI et al., 2019). Nos estudos desse impacto, são utilizados alguns níveis de contaminação para inferir a toxicidade da substância, visando estabelecer limites de uso ou descarte (NUNES et al., 2023).

O resultado obtido para o impacto da ecotoxicidade terrestre é apresentado na Figura 46, destacando-se os valores encontrados para os impactos da reciclagem de areia, moldagem e fundição de peças.

Abaixo estão listados alguns dos principais efeitos da fundição sobre a ecotoxicidade terrestre:

- Poluição do solo: No processo de fundição, existem substâncias químicas e metais pesados, como chumbo, mercúrio, cádmio e arsênio, que podem ser liberados no solo. Alguns destes contaminantes podem persistir no ambiente por longos períodos e também afetar de modo negativo a qualidade do solo, tornando-o inadequado para o crescimento adequado e saudável de plantas e organismos do solo (CATINON et al., 2011).
- Água contaminada: Na utilização de água nos processos de fundição, tem-se a água de resfriamento, que pode conter poluentes e metais pesados. Quando não tratada de forma adequada, a água contaminada pode infiltrar-se no solo e chegar a atingir os lençóis freáticos, contaminando as fontes de água subterrânea. Causando ainda impactos negativos na vida aquática e podendo afetar as plantas e animais terrestres que precisam dessas fontes de água.

**Figura 46-** Resultado do impacto de ecotoxicidade terrestre em kg 1,4-DB equivalente



Fonte: Autor, 2024

- Emissões atmosféricas: De fato, na fundição as emissões atmosféricas de gases e partículas são de modo geral consideradas comuns. Isso inclui as emissões de dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis e partículas finas. É importante ressaltar que essas emissões podem contribuir para a poluição do ar e, ainda quando depositadas no solo por meio da deposição úmida ou seca, podem afetar de maneira direta os organismos terrestres e ainda a vegetação.

- Acúmulo de metais pesados nas cadeias alimentares: Na contaminação do solo e da água por metais pesados oriundos da fundição ocorre os acúmulos dessas substâncias (metais pesados) nas cadeias alimentares. Estes metais pesados são absorvidos pelas plantas e, depois, transferidos para os animais que se alimentam dessas plantas. Conforme os metais pesados se acumulam em níveis mais altos na cadeia alimentar, eles geram efeitos nocivos à saúde dos animais, como danos ao sistema nervoso, problemas reprodutivos e diminuição da taxa de sobrevivência (CATINON et al., 2011).

### 5.3.2 RESULTADO RECIPE

O resultado encontrado na Tabela 5 se refere à modelagem realizada considerando-se o processo que utiliza material novo, e na Tabela 6 para o processo com material reciclado. Nas demais seções serão apresentados gráficos dos principais impactos abordados pelo método RECIPE.

**Tabela 5-** Resultado dos impactos para material novo usando-se o método RECIPE

Impacto	Unidade	Molde areia	Fundição	Peça fundida	Resultado Final
Formação de partículas finas	kg PM <sub>2,5</sub> eq	0,0929420	6,560798	1,8501102	8,503850203
Escassez de recursos fósseis	kg petróleo eq	12,118964	21,8286	114,66512	148,612682
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	1,1157097	110,9819	9,2130474	121,3106571
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,0079108	1,217769	0,0559819	1,281661672
Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	1,93681476	2,879344	0,9906942	5,80685296
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	2,8860996	2,9186	0,8195088	6,624208398
Toxicidade humana - não cancerígena	kg 1,4-DCB	13,220257	2,563	0,713629	16,49688647
Radiações ionizantes	kBq Co-60 eq	0,88218207	9,7844	3,0671378	13,73371987
Uso da terra	m <sup>2</sup> a crop eq	9,5140702	141,9886	11,568976	163,0716458
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	1,5685837	9,9108	1,9494281	13,42881185
Eutrofização marinha	kg N eq	0,0009030	0,131065	0,0310422	0,163010273
Escassez de recursos minerais	kg Cobre eq	1,6848874	190,559	1,7992451	194,0431325
Formação de ozônio, saúde humana	kg NO <sub>x</sub> eq	0,2376980	10,05331	4,2686486	14,55965658
Formação de ozônio, ecossistema terrestre	kg NO <sub>x</sub> eq	0,24152443	10,17669	4,3202577	14,73847213
Depleção do ozônio, ecossistema terrestre	kg CFC11 eq	0,0022927	0,001114	0,0002405	0,003647205
Acidificação terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	0,2276861	12,04051	3,6879553	15,95615141
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	8,0873157	10,662	0,99038	19,7396957
Consumo de água	m <sup>3</sup>	1,6395975	25,5418	23,377688	50,55908584

Fonte: Autor, 2024



**Tabela 6-** Resultados dos impactos para material reciclado usando-se o método  
RECIPE

Impacto	Unidade	Nióbio reciclado	Processo reciclagem areia	Molde de areia	Fundição	Peça Fundida	Resultado Final
Formação de partículas finas	kg PM2,5 eq	2,6819E-06	0,006257	0,037681	4,710688	0,054443	4,8090713
Escassez de recursos fósseis	kg petróleo eq	0,0003555	0,829317	5,217853	17,163482	7,565019	30,776027
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	1,3128E-05	0,030627	0,702546	101,7688	0,992626	103,49466
Eutrofização de água doce	kg P eq	1,7212E-07	0,000402	0,002721	1,161787	0,003870	1,168781
Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	0,0016315	0,806113	1,25806	2,437058	0,698815	5,2016778
Toxicidade cancerígena humana	kg 1,4-DCB	4,8837E-05	0,113932	1,203615	1,990912	0,538066	3,8465744
Toxicidade humana - não cancerígena	kg 1,4-DCB	0,00038355	0,894785	8,781379	1,988494	0,846141	12,511182
Radiações ionizantes	kBq Co-60 eq	0,0001278	0,298258	1,453601	7,717262	2,428399	11,897648
Uso da terra	m <sup>2</sup> a crop eq	0,0001017	0,23729	1,678647	130,4196	2,205599	134,54126
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	1,8937E-05	0,044178	0,912869	8,416519	1,282816	10,656400
Eutrofização marinha	kg N eq	1,8764E-07	0,000438	0,00161	0,120023	0,002598	0,124669
Escassez de recursos minerais	kg Cobre eq	1,4003E-06	0,003267	1,623321	105,3139	1,635477	108,57596
Formação de ozônio, saúde humana	kg NO <sub>x</sub> eq	2,9663E-06	0,00692	0,069799	5,784661	0,088470	5,9498539
Formação de ozônio, ecossistema terrestre	kg NO <sub>x</sub> eq	3,0326E-06	0,007075	0,071222	5,85643	0,090297	6,0250293
Depleção do ozônio, ecossistema terrestre	kg CFC11 eq	4,0747E-09	0,000009	0,000040	0,000873	6,587E-05	0,0009885
Acidificação terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	7,1908E-06	0,016775	0,096414	8,352555	0,140825	8,6065755
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	0,0021548	5,027076	3,21924	9,071620	0,539794	17,859885
Consumo de água	m <sup>3</sup>	0,0001596	0,37228	1,385908	24,16411	22,27189	48,194353

Fonte: Autor, 2024.

Os limites são determinados na fase de definição do objetivo e do escopo (REBITZER et al., 2004). Os resultados encontrados para a fundição de 800 lingotes de ferro fundido cinzento com nióbio, utilizando materiais e processos de reciclagem, são apresentados nas próximas seções.

#### *5.3.2.1 Formação de partículas finas*

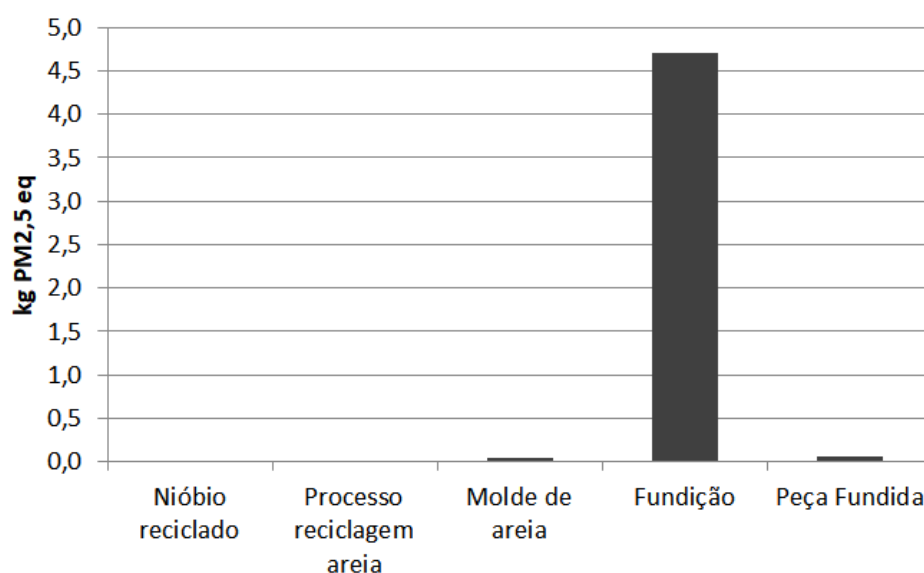
A formação de partículas finas no processo de fundição é um aspecto muito preocupante, devido seu impacto ambiental na indústria metalúrgica. Muitas vezes essas partículas finas são caracterizadas como material particulado suspenso (MPS), e possui variação de tamanho e também composição, no entanto estas partículas consistem principalmente em pequenas partículas sólidas que são liberadas no ar durante as operações de fundição (CHANG et al., 2005). O impacto ambiental dessas partículas é considerável e abrange diversas áreas como a qualidade do ar onde ocorreu a liberação de partículas finas durante a fundição, o que contribui para a poluição do ar. Nas partículas fina também podem ser encontrados metais pesados (chumbo, cádmio e mercúrio), bem como compostos orgânicos voláteis. Se inaladas, essas partículas podem causar problemas respiratórios em seres humanos e animais, e também contribuir para doenças relacionadas ao coração. O resultado encontrado para a formação de partículas finas para o processo reciclado obteve menor valor (Figura 47).

Na exposição de partículas finas advindas da fundição existe o risco de série de problemas relacionados a saúde humana, incluindo doenças respiratória crônicas como a asma. As partículas também podem entrar na corrente sanguínea e afetar outros órgãos (YILMAZ et al., 2015). As partículas finas que são liberadas no ar podem também se depositar no solo e na água, o que pode afetar a qualidade do solo e também prejudicar a agricultura e a biodiversidade, as partículas finas podem também acabar chegando a rios e lagos, prejudicando de forma efetiva a vida aquática e a qualidade da água potável.

A poluição do ar e da água resultante da formação de partículas finas pode afetar de forma negativa a biodiversidade local. Toda uma estrutura natural e elementar como as plantas, os animais e os ecossistemas aquáticos podem também

ser prejudicados pela contaminação, como resultado se terá uma grave perda de habitat e declínio nas populações de espécies (MANCINI et al., 2015).

**Figura 47-** Resultado para formação de partículas finas em kg PM<sub>2,5</sub> eq.



Fonte: Autor, 2024.

### 5.3.2.2 Recursos fósseis

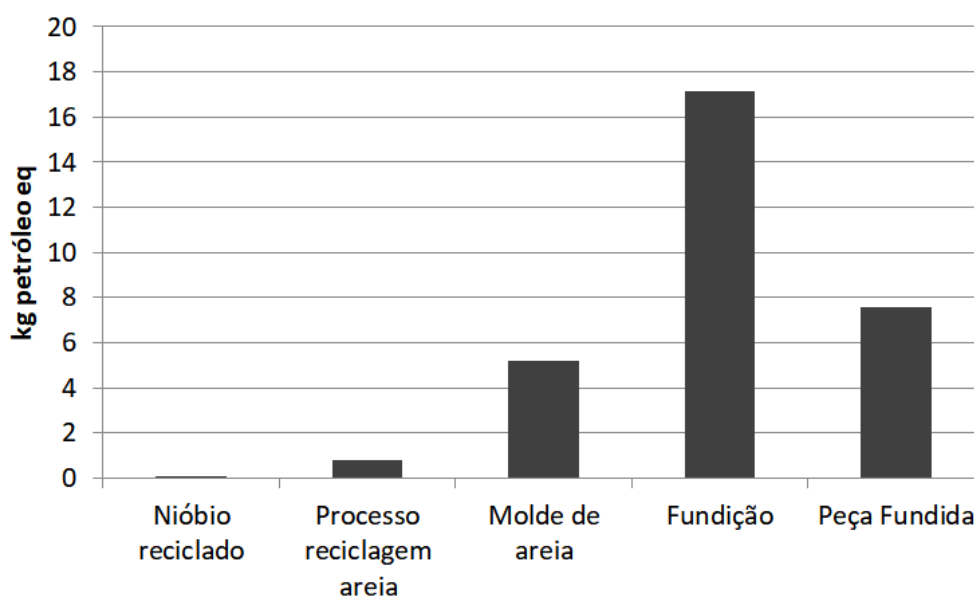
No impacto de recursos fósseis (Figura 48), o processo com materiais reciclados obteve melhor resultado. A extração e utilização de recursos fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás natural, têm desempenhado um papel crucial na sociedade industrializada, fornecendo energia e materiais para uma variedade de aplicações. No entanto, o processo de fundição, que frequentemente está associado à extração e processamento desses recursos, tem um impacto ambiental significativo que precisa ser considerado (HOENOW; KIRK, 2021).

A fundição usando-se recursos fósseis envolve a queima de combustíveis fósseis para gerar calor e energia. Esse processo além de colaborar para os esgotamentos de recursos naturais, também libera quantidade significativa de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e óxido

de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) na atmosfera. Vale lembrar que esses gases contribuem para o aquecimento global e as mudanças climáticas (DONEY et al., 2007).

Um dos efeitos da extração de recursos fósseis é a remoção de grandes áreas de vegetação, levando ao desmatamento e à degradação do solo. Como consequência, tem-se a perda de habitats naturais e ainda redução da biodiversidade. A exploração de recursos fósseis pode levar à destruição de ecossistemas inteiros, como pântanos, áreas costeiras e florestas, prejudicando a fauna e flora locais (YOOL et al., 2013). Por fim, o uso intensivo de recursos fósseis na fundição também contribui para a escassez desses recursos não renováveis, o que pode levar a conflitos e competição crescente por esses materiais.

**Figura 48-** Resultado para o impacto de escassez de recursos fósseis em kg petróleo eq.



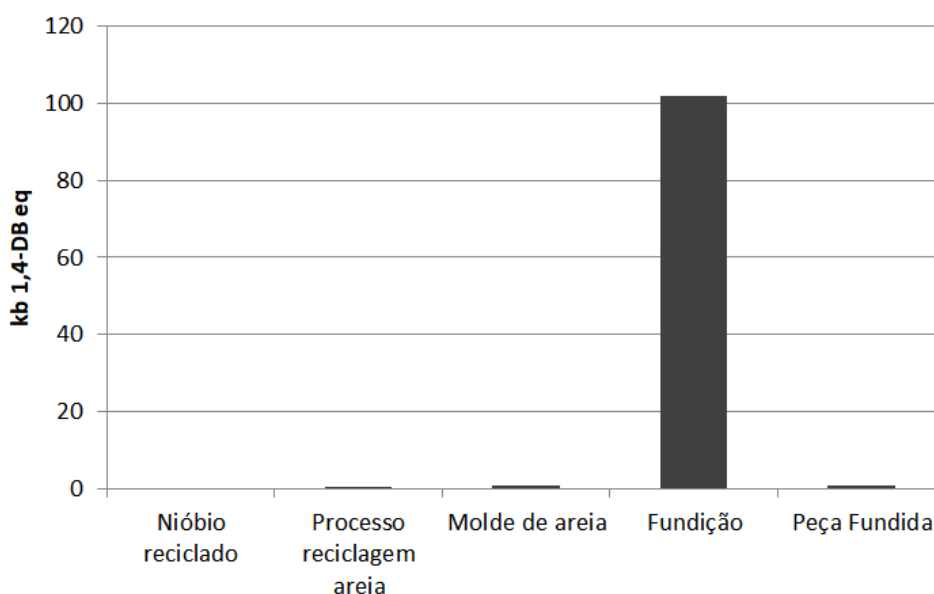
Fonte: Autor, 2024.

### 5.3.2.3 Ecotoxicidade em água doce

A ecotoxicidade em água doce têm um papel bastante significativo e muitas vezes negligenciado no processo de fundição de metais. Trata-se de um fenômeno que se refere à capacidade de substâncias químicas, que poder ser encontrados no processo de fundição, em prejudicar os organismos aquáticos e os ecossistemas

aquáticos como um todo. Os impactos da ecotoxicidade (Figura 49) em água doce no processo de fundição são diversos e demandam a atenção devido às suas implicações ambientais e econômicas (LUNARDI et al., 2018). O processo utilizando material reciclado obteve um melhor resultado.

**Figura 49-** Resultados para o impacto de ecotoxicidade de água doce em kg 1,4-DB eq



Fonte: Autor, 2024.

É durante o processo de fundição, que várias substâncias químicas, como metais pesados e compostos orgânicos voláteis, que são frequentemente utilizadas entram em contato com a água doce, podendo contaminá-la. Como consequência essa contaminação pode prejudicar a qualidade da água, tornando-a inadequada para o consumo humano, agrícola e industrial (EMENIKE et al., 2021).

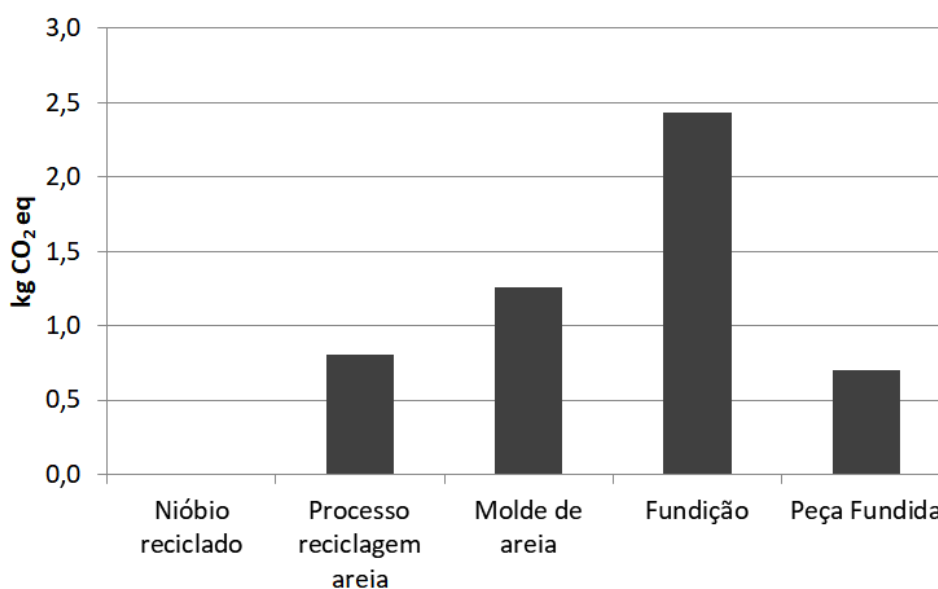
Diversos produtos químicos que são usados no processo de fundição são considerados tóxicos para os organismos aquáticos. Uma vez lançados na água, esses produtos químicos podem gerar a morte de peixes, insetos aquáticos e também outros organismos que fazem parte da cadeia alimentar aquática. Isso pode acarretar um desequilíbrio do ecossistema aquático, afetando a biodiversidade e reduzindo a disponibilidade de recursos naturais (AURANGZEB et al., 2014).

Sabe-se que alguns poluentes liberados durante a fundição têm a capacidade de se acumular nos tecidos dos organismos aquáticos. Isso significa que, mesmo em concentrações aparentemente reduzidas na água, esses poluentes podem se tornar altamente concentrados em organismos ao longo do tempo (CELMA et al., 2023). Esta situação pode gerar um grave impacto negativo tanto na saúde humana, quanto na cadeia alimentar, uma vez que os predadores aquáticos consomem presas que podem estar contaminadas e, portanto, os poluentes podem se acumular ainda mais.

#### 5.3.2.4 Aquecimento global

O processo de fundição tem um papel significativo no aquecimento global, graças às suas emissões de gases de efeito estufa e também ao alto consumo de energia envolvido (HOUGHTON, 2001). A Figura 50 mostra os valores encontrados para o impacto de aquecimento global para o processo que utiliza material reciclado.

**Figura 50-** Resultado para o impacto de aquecimento global em kg CO<sub>2</sub> eq.



Fonte: Autor, 2024.

A fundição exige um alto gasto em energia. Os fornos que são utilizados para fundir metais, como alumínio, ferro e aço, trabalham em altas temperaturas, o que

exige enormes quantidades de eletricidade ou combustíveis fósseis, dependendo do forno, para manter essas temperaturas durante o processo de fusão metal. Ocorre que, a demanda desta quantidade energia gera uma grande e significativa liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera.

Além do CO<sub>2</sub> liberado pela energia necessária para fundir metais. Gases como os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e monóxido de carbono (CO) também são reflexos das emissões do processo de fundição e contribuem para o aquecimento global. A fundição de alumínio envolve ainda o processo químico da eletrólise, que emite perfluorcarbonos (PFCs), compostos extremamente potentes de efeito estufa.

Na produção de minério de ferro e bauxita (elementos metálicos utilizados na fundição) é necessário realizar atividades de mineração que pode gerar desmatamento, degradação do solo e perda de biodiversidade. O que inevitavelmente contribui para a degradação ambiental e aumento das emissões globais de CO<sub>2</sub>.

Destaca-se também que o processo de fundição necessita de grandes quantidades de água para a etapa de resfriamento e outras operações. Isso pode levar à escassez de água em áreas já prejudicadas pela falta desse recurso (WORRELL, 2011).

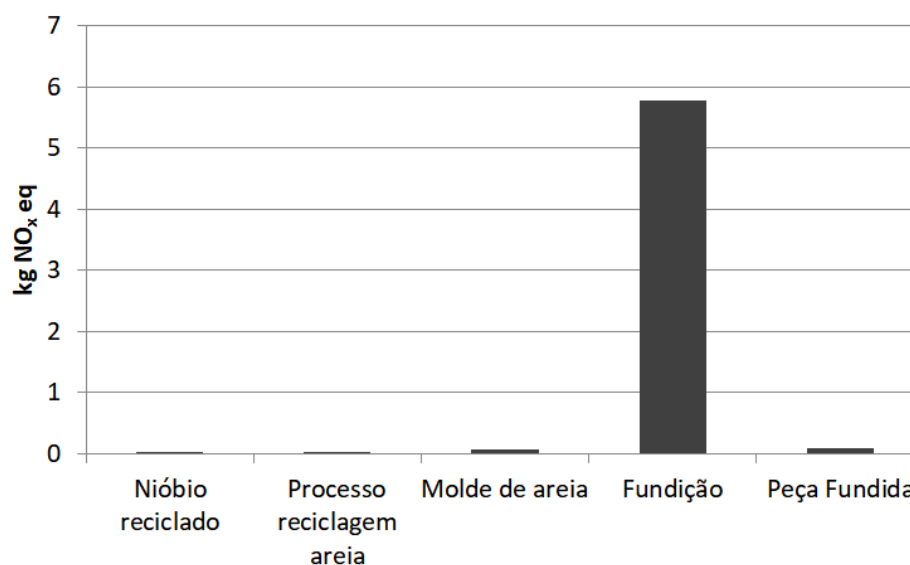
Por fim, para mitigar o impacto do processo de fundição no impacto ambiental de aquecimento global é fundamental que a indústria caminhe para a adoção de mais sustentáveis, tais como a redução do consumo de energia por meio de tecnologias mais eficientes, a utilização de fontes de energia renovável, a captura e o armazenamento de CO<sub>2</sub>, a reciclagem de metais e o desenvolvimento de materiais alternativos com baixo carbono. A implementação de regulamentações ambientais mais rigorosas e a conscientização pública sobre essas questões desempenham um papel crucial na promoção de práticas mais responsáveis na indústria de fundição.

#### *5.3.2.5 Formação de ozônio, saúde humana e ecossistema terrestre*

Os valores encontrados para o impacto de formação ozônio para o material reciclado (Figura 51) na saúde e humana e ecossistema terrestre ficaram parecidos, com vantagem para o material reciclado. Nota -se que a fundição é uma atividade industrial essencial para a produção de uma ampla variedade de produtos, incluindo

metais, peças automotivas e componentes eletrônicos. No entanto, a fundição também tem um impacto significativo na formação de ozônio na atmosfera e, por sua vez, afeta tanto a saúde humana quanto os sistemas ecossistêmicos terrestres.

**Figura 51-** Resultado para impacto da formação de ozônio em kg NO<sub>x</sub> eq.



Fonte: Autor, 2024.

A formação de ozônio na atmosfera ocorre quando poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COVs), reagem na presença de luz solar (HUANG et al., 2014). A fundição é uma fonte importante de emissões de NO<sub>x</sub> e COVs porque durante o processo de fusão de metais e a queima de combustíveis para fornecer a energia necessária os poluentes são liberados na atmosfera, ocorre que eles podem reagir e formar ozônio troposférico, que é um componente considerado prejudicial para a saúde humana e também para os ecossistemas terrestres. Isto pode gerar impactos na saúde humana como problemas respiratórios, incluindo ainda irritação nos olhos, garganta e pulmões. Isso pode piorar condições pré-existentes, como asma e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC).

A poluição atmosférica, incluindo o ozônio, está relacionada ao agravamento de doenças cardiovasculares que aumentam o risco de ataques cardíacos e outros



problemas do coração. Além das questões relacionadas à proteção ambiental, a exposição prolongada ao ozônio pode acarretar em efeitos sistêmicos como inflamações corporais generalizadas e estresse oxidativo associado a diversos possíveis desafios para a saúde humana.

Danos significativos às plantas nos ecossistemas terrestres podem ser causados pelo ozônio troposférico, inibindo a fotossíntese e interferindo no crescimento e na reprodução. Isso afeta qualidades da agricultura e da biodiversidade vegetal. Os animais terrestres dependem das plantas para alimentação e habitat. Portanto, se elas são prejudicadas pelo ozônio, isso aumenta à diminuição do ecossistema de herbívoros e previsões ao longo da cadeia alimentar. O impacto do ozônio pode desencadear mudanças nas espécies que ocorrem em habitats específicos nos ecossistemas terrestres, criando desequilíbrios ambientais com perda de biodiversidade nesses locais.

#### *5.3.2.6 Ecotoxicidade e eutrofização marinha*

Foram encontrados valores aproximados para ecotoxicidade marinha e eutrofização marinha (Tabelas 8 e 9). A ecotoxicidade marinha refere-se à capacidade de substâncias químicas liberadas no ambiente marinho afetarem negativamente os organismos aquáticos. A fundição contribui para a ecotoxicidade marinha de várias maneiras.

Geralmente o processo de fundição envolve o uso de metais como ferro, alumínio, zinco e cobre. Quando estes metais não são geridos adequadamente, podem ser libertados no ambiente marinho. Estas substâncias tóxicas podem ter efeitos nocivos sobre uma variedade de organismos marinhos, como peixes, moluscos e algas, perturbando os seus processos fisiológicos e reprodutivos. Além disso, os processos de extração podem gerar compostos orgânicos, incluindo compostos orgânicos voláteis (VOCs) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), que apresentam riscos significativos à vida aquática quando acumulados nas cadeias alimentares, causando danos em longo prazo (YANG et al., 2008).

O descarte final de resíduos hídricos tais como cinzas e escórias, pode provocar a liberação de emissões nocivas em ambientes literários. Tal fato acaba por interferir nos ecossistemas frágeis existentes nestes locais - dentre os quais

destacam-se estuários e mangues, que atuam como ninhos importantes para diversas espécies marinhas.

A eutrofização é outro impacto ambiental sério também associado à fundição, embora de forma indireta. A eutrofização marinha ocorre quando existe um aumento excessivo de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, nos oceanos (CHISLOCK et al., 2013). O processo de fundição contribui para a eutrofização de várias maneiras. A fundição frequentemente faz o uso de fertilizantes e outros produtos químicos para melhorar a produtividade das culturas utilizadas no processo (YANG et al., 2008). Esses produtos químicos contêm alguns nutrientes como nitrogênio e fósforo, que, quando não gerenciados adequadamente, podem ser lavados para os cursos d'água e, eventualmente, chegar aos oceanos.

Geralmente, as áreas industriais de proteção possuem superfícies impermeáveis como estradas e estacionamentos, o que pode contribuir para a eutrofização por transporte de águas pluviais ricas em nutrientes até corpos d'água.

#### *5.3.2.7 Depleção de ozônio, ecossistema terrestre*

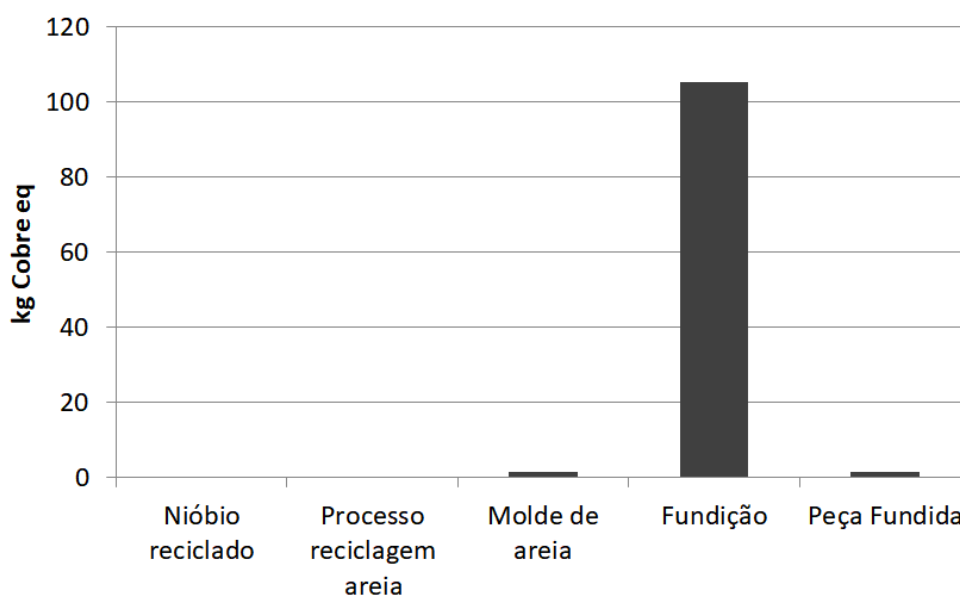
Os valores encontrados para a depleção da camada de ozônio mostraram maior preservação ambiental ao se optar pelo processo que utiliza material reciclado (Tabela 9). A depleção da camada de ozônio refere-se à redução na concentração de ozônio ( $O_3$ ) na estratosfera da Terra (BOLAJI; HUAN, 2013). A camada de ozônio é crucial porque absorve grande parte da radiação ultravioleta (UV) emitida pelo Sol, agindo como uma barreira protetora que impede a maioria desses raios prejudiciais de atingir a superfície da Terra. No entanto, a atividade humana, incluindo a fundição, tem contribuído para a degradação dessa camada vital (HUANG et al., 2014).

Além do consumo de energia, alguns processos de fundição utilizam substâncias químicas que contêm cloro ou bromo, como os halocarbonetos, que são altamente deplecionadores da camada de ozônio quando liberados na atmosfera. Embora regulamentações internacionais tenham limitado o uso dessas substâncias, sua utilização inadequada ou vazamentos ainda podem ocorrer.

### 5.3.2.8 Escassez de recursos minerais

O melhor resultado encontrado para o processo de fundição que utiliza material reciclado foi para o impacto de escassez de recursos minerais (Figura 52), que mostra a importância da utilização de processos que visem uma produção mais limpa. O processo de fundição impacta a escassez de recursos minerais de várias maneiras, o que torna importante considerar a sua sustentabilidade.

**Figura 52-** Resultados para a escassez de recursos minerais em kg Cobre eq.



Fonte: Autor, 2024.

O consumo de materiais primários não dispensa o uso extensivo de minerais metálicos, tais como ferro, alumínio, cobre e zinco. Esse consumo contribui para o aumento progressivo das reservas disponíveis destes recursos finitos. Descobrir esses materiais é uma operação que requer muita energia; fundir e moldar metais exigem temperaturas muito elevadas. A extração e o processamento dos minerais necessários também consomem grande quantidade de energia, resultando em forte demanda por fontes energéticas - geralmente derivadas do petróleo - os quais são finitos na natureza, aumentando ainda mais sua deficiência futura.

A produção gera uma quantidade significativa de resíduos e impurezas, contribuindo para a contaminação do solo e da água nas proximidades das

instalações. Isso resulta na emissão de substâncias tóxicas como metais pesados e compostos químicos, afetando a qualidade do meio ambiente e das comunidades locais. Além disso, é necessário utilizar grandes quantidades de água para refrigerar equipamentos e processos industriais. Em algumas situações ainda há impacto social envolvido no processo de mineração de recursos necessários à produção industrial que envolve deslocamentos provocados ou até mesmo conflitos com populações tradicionais locais.

Para reduzir o impacto da fundição na escassez de recursos minerais, é crucial buscar alternativas mais sustentáveis, como a reciclagem, eficiência energética, tecnologia limpas, fontes de energia renovável e também uma mineração responsável com práticas que reduzam o impacto social e ambiental (DA SILVA et al., 2023).

#### *5.3.2.9 Toxicidade humana cancerígena e não cancerígena, radiação ionizante e uso da terra*

A toxicidade humana carcinogênica na fundição de metais é causada pelo manuseio e processamento de substâncias químicas perigosas (ETTRUP et al., 2017). Um exemplo é o chumbo, que foi amplamente utilizado em processos de fundição no passado e, ainda, é considerado um problema em algumas regiões. A exposição indevida ao chumbo e seus compostos pode causar vários problemas de saúde, incluindo danos ao sistema nervoso e um aumento do risco de desenvolvimento de câncer.

Além do chumbo, outros metais pesados como o cádmio e o mercúrio também estão associados à toxicidade humana carcinogênica. A inalação ou ingestão de partículas e vapores de substâncias tóxicas pode levar a sérios problemas de saúde em longo prazo, incluindo câncer (LIAN et al., 2019).

O uso de radiação ionizante em superfícies metálicas pode envolver o emprego de equipamentos que emitem essa radiação, tais como raios-X ou feixes de partículas para fins de inspeção e controle de qualidade de peças de fundidas. No entanto, uma exposição prolongada ou frequente à radiação referida pode aumentar o risco de desenvolvimento do cancro entre trabalhadores atuantes no setor dos recursos naturais (CHANG et al., 2010).

No uso da terra a atividade de fundição geralmente requer uma grande área para acomodar instalações industriais, realizar a estocagem de matéria-prima e ainda o descarte de resíduos. Isso acaba gerando um impacto significativo no uso da terra e no ambiente local. O desmatamento, a compactação do solo e a degradação do ecossistema podem ocorrer como resultado da expansão das operações de fundição. Além disso, o descarte inadequado de resíduos industriais, como escórias e cinzas, pode contaminar o solo e a água subterrânea, tornando as áreas circundantes inadequadas para o desenvolvimento futuro e a agricultura.

#### 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS CML E RECIPE

Ao analisar os resultados de ambos os métodos, pode-se notar algumas diferenças significativas. Contudo, vale ressaltar que esses dois métodos apresentam abordagens distintas em seus modelos matemáticos para realizar o cálculo dos impactos.

O modelo CML se enquadra nos métodos de entrada e saída, pois utiliza uma matriz de consumo-produto para calcular os fluxos de materiais e energias em uma economia. Guinée e Lindeijer (2002) explica o método matemático utilizado pela CML de maneira clara.

Para realizar uma avaliação do ciclo de vida mediante o método CML, devem ser informados os impactos ambientais associados a cada setor econômico. Isto pode incluir dados sobre emissões de gases de efeito de estufa, consumo de energia, utilização de recursos naturais e outros. A partir daí pode-se calcular os impactos ambientais associados à demanda final da economia considerando as relações entre os setores de atuação e os impactos associados a cada unidade produtiva.

Com esta abordagem para a realização dos cálculos, tem-se no método CML resultados que divergem em valores do método RECIPE. Entretanto, os resultados encontrados em ambos os métodos, mostram que a utilização de material reciclado é mais benéfica ao meio ambiente em comparação com o uso de materiais novos. Além disto, deve-se levar em consideração o fato de que o método CML não é atualizado desde 2002, enquanto o método RECIPE vem sofrendo constantes atualizações desde 2017, ano de sua criação.

O método CML é uma abordagem que permite a modelagem das interações complexas entre diferentes setores econômicos e fornece uma visão abrangente dos impactos ambientais de produtos e processos ao longo de sua vida útil. No entanto, sua implementação requer dados detalhados sobre a economia e os impactos ambientais associados a cada setor, o que pode ser um desafio em alguns casos.

O método RECIPE não se baseia em um único modelo matemático, mas em uma série de fórmulas e estimativas que permitem calcular os impactos ambientais de um produto com base em informações simplificadas. Ele envolve a divisão dos impactos ambientais em categorias, como energia, recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa, entre outros. Ele calcula os fatores que caracterizam o impacto ambiental de um produto ou processo.

No método RECIPE parte-se do *midpoint* e *endpoint*, que envolvem a análise de impactos ambientais a partir do ponto médio ao ponto final. Essas etapas ajudam a quantificar o impacto de um produto ou processo no meio ambiente.

Os fatores do ponto médio ao ponto final são fixos para cada categoria de impacto. Isso ocorre porque, após determinar onde o impacto ocorre no processo causa-efeito, os mecanismos ambientais são considerados idênticos para todos os estressores nessa categoria (REPORT RECIPE, 2016).

Uma tabela é fornecida para listar os fatores do ponto médio ao ponto final para danos à saúde humana, ecossistemas terrestres, ecossistemas de água doce, ecossistemas marinhos e escassez de recursos. Isso ajuda os analistas a aplicar os fatores corretos aos seus cálculos de impacto (REPORT RECIPE, 2016). A única exceção é a escassez de recursos fósseis, para a qual não foi possível estabelecer fatores globais constantes de ponto médio ao ponto final devido à falta de compreensão completa da causa-efeito nessa categoria.

O método RECIPE faz uma relação quantitativa entre os processos dimensionados para o fluxo de referência decorrente da unidade funcional, ou seja, o resultado do cálculo é um conjunto de processos interligados e dimensionados, cada um com intervenções ambientais dimensionadas e que geralmente são agregadas.

Os cálculos do método RECIPE baseiam-se geralmente em matrizes porque permitem relações recursivas. O cálculo dos resultados encontrados no inventário inclui ainda uma agregação de todas as intervenções em todos os processos

unitários. Entretanto, também existem resultados não agregados, que servem a diferentes tipos de propósitos.

As fórmulas e os parâmetros específicos usados no método RECIPE também podem variar dependendo do contexto e da aplicação, pois ele foi projetado para ser flexível e adaptável a diferentes situações. Geralmente, o método RECIPE envolve a coleta de dados sobre o consumo de recursos, emissões e outros fatores relevantes ao longo do ciclo de vida de um produto e, em seguida, a aplicação de fatores de impacto ambiental a esses dados para calcular os impactos totais.

A aplicação do método RECIPE pode variar entre organizações e projetos específicos, e as fórmulas e os fatores de impacto ambiental podem ser personalizados com base nas necessidades e nos recursos disponíveis (REPORT RECIPE, 2016).

Os resultados mostram que nas categorias estudadas, há uma forte relação entre os fatores de caracterização utilizados nos métodos CML e RECIPE, uma vez que o RECIPE possui bases de desenvolvimento derivadas do CML. No entanto, ainda assim não existe uma padronização em relação ao fator peso e unidades de medida (NETO, 2020), ou seja, os índices podem apresentar diferenças significativas em determinadas categorias.

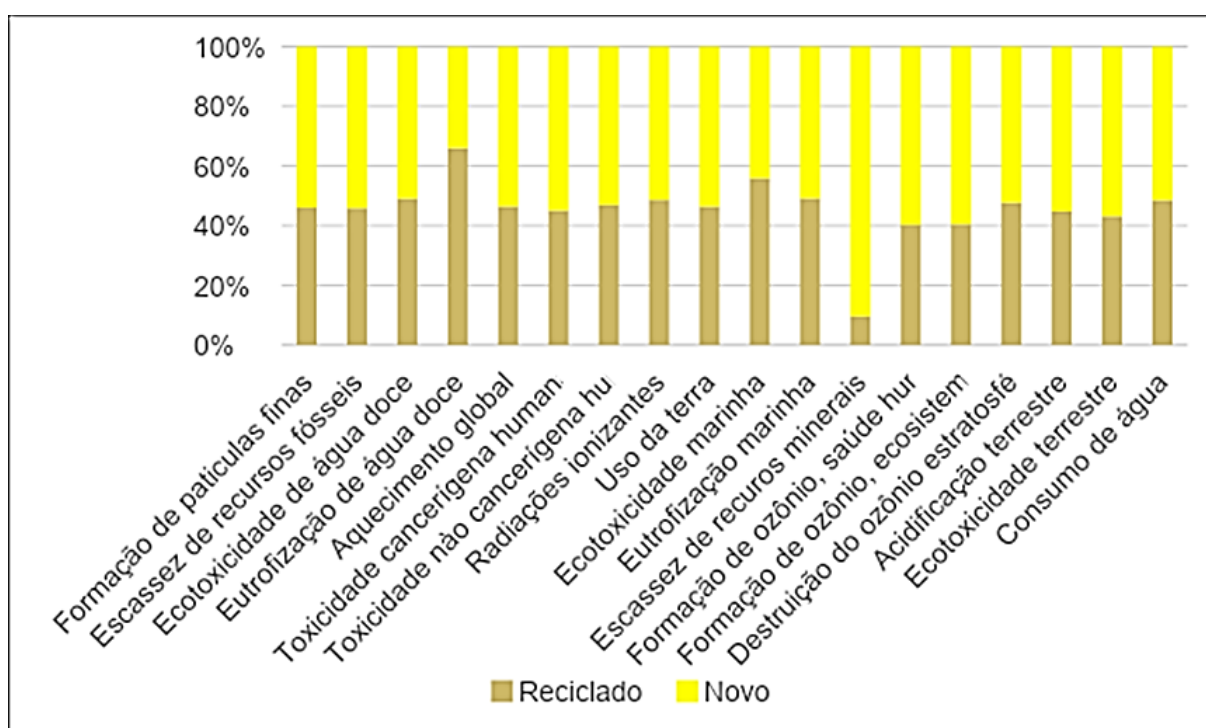
Em comparação, o método CML inclui uma variedade de categorias de impacto, como mudança climática, acidificação, eutrofização, entre outras. Já o método RECIPE também inclui várias categorias de impacto, mas sua estrutura é mais modular, permitindo a inclusão de categorias específicas de acordo com as necessidades do estudo. Ele foi projetado para ser mais flexível em termos de categorias de impacto.

O método CML é um método mais estabelecido e menos flexível em comparação com o RECIPE, tendo categorias de impacto fixas. O RECIPE que é altamente flexível e permite a adaptação às necessidades específicas, e isso o torna adequado para uma gama mais ampla de aplicações de ACV.

Para as unidades de medidas CML usa-se uma variedade de unidades de medida para expressar os resultados das categorias de impacto, como kg CO<sub>2</sub> equivalente para mudança climática. Por sua vez, o RECIPE também usa unidades de medida diversas, mas sua estrutura modular permite maior flexibilidade na escolha das unidades de medida adequadas.

Observa-se também nos resultados encontrados utilizando-se o método RECIPE, que a utilização de material reciclado no processo de fundição resulta em um menores impactos ambientais, como mostra o gráfico com valores normalizados na Figura 53. Este gráfico inclui os impactos ambientais considerados no método RECIPE, sendo bastante útil para visualizar de maneira comparativa os resultados para diferentes processos e/ou materiais.

**Figura 53-** Gráfico normalizado RECIPE Novo X Reciclado



**Fonte:** Autor, 2024.

De modo geral, os métodos CML e RECIPE utilizados na avaliação de ciclo de vida desta pesquisa, diferem em alguns pontos em termos de abordagem, categorias de impacto, flexibilidade e detalhes metodológicos. A escolha entre esses métodos depende das necessidades específicas do estudo e das categorias de impacto relevantes para a avaliação ambiental que está sendo realizada. É importante consultar as diretrizes e documentações mais recentes de cada método ao realizar uma ACV.



## 6 CONCLUSÕES

O estudo realizado sobre os efeitos da adição de nióbio em uma liga de ferro, materiais advindos de sucata, mostra-se necessário em um cenário em que se tem buscado avanços tecnológicos visando a sustentabilidade.

Esta pesquisa apresentou um modelo de produção de 800 lingotes de ferro fundido cinzento utilizando material reciclado de um fornecedor e o reaproveitamento de material da própria fábrica, como a areia reciclada utilizada na preparação dos moldes.

No contexto da mineração urbana, este estudo enfatiza a relevância de explorar e aproveitar os recursos disponíveis. A reciclagem de materiais provenientes de produtos descartados, como aparelhos eletrônicos e estruturas desativadas, não apenas reduz a necessidade de extração de materiais virgens, mas também minimiza a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários (PENGWEI; YASHAN, 2023).

Como mencionado anteriormente, o processo de fundição é um dos processos de manufatura mais antigos da história, mantendo-se como um dos principais processos para a fabricação de materiais metálicos (RIPOSAN et al., 2020), daí a necessidade do seu aprimoramento, bem como a busca por alternativas que visem uma produção mais limpa. Uma parte deste trabalho investigou de que forma se comporta a microestrutura do ferro fundido contendo alguns materiais advindos de sucata, e conclui-se que sua estrutura permanece a mesma de um ferro fundido que utiliza materiais virgens.

Observa-se nas amostras a formação de grafita que ocorre no momento de solidificação do ferro, sendo um resultado comum, tendo implicações significativas nas propriedades e aplicações (RIPOSAN et al., 2020), a formação de grafita revela também o excesso de carbono na liga em relação ao teor máximo que pode ser dissolvido no ferro sólido (MARTIN, 2015).

Tem-se também a formação de perlita, a qual contém lamelas alternadas de ferrita e cementita, resultando em propriedades mecânicas e físicas desejáveis. A perlita confere ao ferro fundido uma maior tenacidade, tornando-o mais resistente a impactos e cargas cíclicas. Isso é especialmente importante em aplicações que exigem resistência a choques, como componentes de máquinas e equipamentos

industriais (SATERNUS; SOCHA, 2023). A perlita também proporciona um material que proporciona melhor usinabilidade, uma vez que ferros fundidos com microestrutura perlítica são mais fáceis de usinar, o que é crucial em processos de fabricação que envolvem a usinagem de peças complexas e precisas, como componentes automotivos e peças de máquinas (DA SILVA, 2022).

Há também a presença de ferrita, com teor de 0,8%, atestando a boa qualidade do material. Ductilidade e resistência à corrosão são fatores benéficos para um material que possui ferrita em sua microestrutura (SPINOLA; SPINELLI, 2016; PRIJANOVIC et al., 2023).

A adição de nióbio foi benéfica, proporcionando uma boa resistência mecânica ao ferro fundido, tornando-o adequado para aplicações que exigem alta resistência. Os benefícios da adição de nióbio podem variar dependendo da quantidade de nióbio adicionada, da composição do ferro fundido cinzento e das condições de processamento. Portanto, é essencial realizar testes e avaliações específicas para determinar a quantidade ideal de nióbio e as condições de processamento para atender os requisitos da aplicação desejada.

No ensaio de usinabilidade, os resultados encontrados mostram-se muito similares a demais estudos presentes na literatura (MARTIN, 2015), tendo o material fundido uma boa usinabilidade e também acabamento superficial, o que é essencial para manter a qualidade da produção, garantir a eficiência do processo de usinagem, reduzir os custos de produção, manter a segurança no local de trabalho e prolongar a vida útil das máquinas e ferramentas (SIGNORELLI et al., 2022). No entanto, se faz necessário um maior aprofundamento nos testes de usinabilidade, como, por exemplo, realizar análise do desgaste do inserto de forma parcial, ou seja, observando o desgaste a cada aumento de velocidade e profundidade de corte. O monitoramento sonoro mostrou que durante o ensaio de usinagem na fresadora, os ruídos se mantiveram abaixo de 85 dB, o que confere um ambiente sonoro seguro conforme a norma regulamentadora (ZANUTO, 2016). Para o acabamento superficial os valores que foram encontrados para as diferentes amostras mostram-se muito próximos uns dos outros, independente da variação de percentual do material inoculados.

Na análise de ciclo de vida, dentre os dois métodos utilizados, o método CML utiliza técnicas de normalização e ponderação (ZANUTO, 2016; ZANUTO et al.;

2019). O método CML ainda possui um único modelo matemático, o que difere do método RECIPE, com diferentes modelos matemáticos. Outra questão importante é que o método CML não é atualizado desde 2002, enquanto o método RECIPE é atualizado com frequência desde sua criação em 2017.

As operações de reciclagem de areia e preparação de moldes de areia causaram impactos significativos em comparação com as outras fases consideradas. Uma das razões para isso é a presença de ligantes como a bentonita (ver Tabela 1), normalmente utilizados na fabricação de moldes de areia, pois contribuem para a boa qualidade da peça fundida. A bentonita contém elementos como poeira inalável e sílica cristalina (MITTERPACH et al., 2017). O transporte de materiais também contribuiu para esses valores de alto impacto das etapas de reciclagem de areia e preparação de moldes de areia. Embora a reciclagem de areia e a reciclagem de moldes de areia possam ser recomendadas, uma vez que reduzem os custos de utilização de areia nova (DALQUIST; GUTOWSKI, 2004), devem ser aplicadas formas de reduzir o consumo de combustíveis fósseis, como ter o fornecedor mais próximo da fábrica de fundição, ou utilizar veículos movidos a combustíveis menos prejudiciais ao meio ambiente.

O processo que utiliza material reciclado teve um impacto de aquecimento global igual a  $1,07 \times 10^{+01}$  kg CO<sub>2</sub> eq em comparação com  $4,67 \times 10^{+03}$  kg CO<sub>2</sub> eq do processo que utiliza materiais novos. Usando-se o método RECIPE, a formação de ozônio (saúde humana) teve um valor de  $1,09 \times 10^{+01}$  kg NO<sub>x</sub> eq para o processo com material reciclado, enquanto teve  $1,63 \times 10^{+01}$  kg NO<sub>x</sub> eq para materiais novos e, no caso de escassez de recursos minerais, o valor foi igual a  $2,13 \times 10^{+02}$  kg cobre eq usando-se material reciclado, e  $2,01 \times 10^{+03}$  kg cobre eq para o processo usando-se materiais novos.

Os resultados encontrados em ambos os métodos, apesar de divergirem na ordem de grandeza de valores para a maioria dos impactos, mostram que a utilização de material reciclado é mais benéfica ao meio ambiente em comparação com o uso de materiais novos (virgens). Para SPINAK (2024) a divergência de resultados pode estar ligada a variáveis não controladas, no caso da ACV realizadas neste estudo, foram considerados dois métodos com diferentes abordagens, no entanto como já citado anteriormente, apesar de valores diferentes houve convergência em termos de processo.

A utilização de material reciclado na fundição contribui para a conservação de recursos naturais, bem como a redução do impacto ambiental. A conservação natural tem um papel fundamental na manutenção e também estabilidade dos ecossistemas, além da construção da biodiversidade (NETO, 2023). A fundição tradicional requer matérias-primas virgens, como minérios metálicos, que são extraídos da Terra (LEBLANC, 2023). Usar material reciclado reduz a necessidade de explorar e extrair recursos naturais finitos, preservando esses recursos para gerações futuras.

A utilização de material reciclado na fundição é fundamental para promover práticas mais sustentáveis na indústria metalúrgica, reduzir o impacto ambiental, economizar recursos naturais e contribuir para uma economia mais circular e responsável do ponto de vista ambiental e econômico (DA SILVA, 2019; LEBLANC, 2023; DA SILVA et al., 2023).

O presente estudo contribuiu com dados que proporcionam para a literatura os efeitos da aplicação de sustentabilidade em um processo de fundição, mostrando não somente a eficácia do processo de fundição que utiliza sucata mantendo a qualidade do material, como também o custo ambiental deste processo.

Sugere-se como trabalho futuro a realização de ACV para outros materiais (como aço e ferro fundido nodular), bem como a avaliação de outros inoculantes como Bário, Zircônio e Estrôncio, que beneficiam a microestrutura do ferro fundido cinzento e, conseqüentemente, sua usinabilidade, aprofundando-se também nos testes de usinagem e na obtenção de imagens dos insertos mediante microscópio eletrônico de varredura.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, H.R., BAZDAR, M., HALVAEE, A. **Effect of phosphorus as an alloying element on microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron**. *Materials Science and Engineering: A*, 444(1-2):314-317, 2007.
- ABDELSHAFY, A., FRANZEN, D., MOHAUPT, A., SCHÜSSLER, J., BÜHRIG-POLACZEK, A., WALTHER, G. **A feasibility study to minimize the carbon footprint of cast iron production while maintaining the technical requirements**. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 9(1):249-265, 2023.
- ABIFA, Associação Brasileira de Fundição, **Revista Fundição & Matérias-primas**. São Paulo, 2023.
- ACERO, A.P., RODRÍGUEZ, C., CIROTH, A. **LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories**. GreenDelta GmbH, Berlim, Alemanha, 23, 2014.
- AHMADI-GH, Z., BELLO-PINTADO, A. **Why is manufacturing not more sustainable? The effects of different sustainability practices on sustainability outcomes and competitive advantage**. *Journal of Cleaner Production*, 337:130392, 2022.
- ANDERSON, H.S., JOHENGEN, T.H., MILLER, R., GODWIN, C.M. **Accelerated sediment phosphorus release in Lake Erie's central basin during seasonal anoxia**. *Limnology and Oceanography*, 66(9):3582-3595, 2021.
- ARAUJO, J.B. **Desenvolvimento de método de avaliação de desempenho de processos de manufatura considerando parâmetros de sustentabilidade**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2010.
- ASM HANDBOOK, **Metals Handbook – Properties and selection: irons, steels and high performance alloys**. 9ª ed. United States of America: ASM, v.1, 1992.
- AURANGZEB, N., NISA, S., BIBI, Y., JAVED, F., HUSSAIN, F. **Phytoremediation potential of aquatic herbs from steel foundry effluent**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31:881-886, 2014.
- AVDUSINOVIC, H., GIGOVIĆ-GEKIĆ, A., CUBELA, D., SUNULAHPASIE, R., MUJEZINOVÍĆ, N. **Influence of inoculation methods and the amount of an added inoculant on the mechanical properties of ductile iron**. *Materiali in Tehnologije*, 49(5):833-836, 2015.
- AZAPAGIC, A., MILLINGTON, A., COLLETT, A. **A methodology for integrating sustainability considerations into process design**. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(6):439-452, 2006.

BAKRY, M., LI, J., ZENG, X. **Evaluation of global niobium flow modeling and its market forecasting.** *Frontiers in Energy*, 17(2):286-293, 2023.

BASTAS, A. **Sustainable manufacturing technologies: A systematic review of latest trends and themes.** *Sustainability*, 13(8):4271, 2021.

BELÉM, M.J.X., Avaliação do desempenho de revestimentos de pentóxido de nióbio aplicados por aspersão térmica, Dissertação de Mestrado, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 2019.

BLOME, C., HOLLOS, D., PAULRAJ, A. **Green procurement and green supplier development: antecedents and effects on supplier performance.** *International Journal of Production Research*, 52(1):32-49, 2014.

BOADA, P.A.A, **Metodologia de benchmarking para o desenvolvimento de produtos e processos mais limpos: Um estudo de caso para peças de PVC.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

BOCKEN, N.M., SHORT, S.W., RANA, P., EVANS, S. **A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes.** *Journal of Cleaner Production*, 65:42-56, 2014.

BOLAJI, B.O., HUAN, Z. **Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant—a review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18:49-54, 2013.

BRASIL, **Norma Regulamentadora 13284** - Preparação de corpos de prova para análise metalográfica. ABNT, 2015.

BRASIL, **Norma Regulamentadora 3685** – Ensaios de vida da ferramenta de ponta. ABNT, 2015.

BRASIL, **Norma Regulamentadora 6593** – Morfologia de grafita de um ferro fundido. ABNT, 2015.

BRASIL, **Norma Regulamentadora NR 15** – Atividade e Operações Insalubres. Portaria SIT n.º 339, de 31 de outubro de 2012, MTE. Brasília, 2012.

BROOKS, L., GAUSTAD, G., GESIN, A., MORTVEDT, T., FREIRE, F. **Ferrous and non-ferrous recycling: challenges and potential technology solutions.** *Waste Management*, 85:519-528, 2019.

BRUNDTLAND, G. **Our common future.** Oxford University Press. 1987.

CAI, W., GENG, Y., LI, M., GAO, Z., WEI, W. **Mapping the global flows of steel scraps: an alloy elements recovery perspective.** *Environmental Research Letters*, 18(9):094048. 2023.

CALDEIRA, K., WICKETT, M.E. **Anthropogenic carbon and ocean pH**. Nature, 425(6956):365-365, 2003.

CAMPOLINA, J.M., SIGRIST, C.S.L., MORIS, V. **A review of the literature on software used in studies life cycle assessment**. Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET), 19(2):735-750, 2015.

CAPRA, F. **As conexões ocultas: Ciência para uma vida sustentável**. Ed. Pensamento-Cultrix Ltda., São Paulo, 9ª Ed., 2009.

CATINON, M., AYRAULT, S., BOUDOUMA, O., ASTA, J., TISSUT, M., RAVANEL, P. **Atmospheric elements deposition and evaluation of the anthropogenic part; the AAEF concept**. Em: Urban Environment: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Urban Environment Symposium (pp. 141-152). Dordrecht: Springer Netherlands, 2011.

CELMA, A., DAHLBERG, A.K., WIBERG, K. **Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives in biochar treated stormwater**. MethodsX, 10:102232, 2023.

CHANG, E.E., WEI-CHI, W., LI-XUAN, Z., HUNG-LUNG, C. **Health risk assessment of exposure to selected volatile organic compounds emitted from an integrated iron and steel plant**. Inhalation Toxicology, 22(sup2):117-125, 2010.

CHANG, M., CHOW, J., WATSON, J., GLOWACKI, C., SHEYA, S. **Caracterização de Emissões de Particulados Finos de Processos de Fundição**. 2005.

CHAUDHARY, I.J., RATHORE, D. **Effects of ambient and elevated ozone on morphophysiology of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and its correlation with yield traits**. Environmental Technology & Innovation, 25:102146, 2022.

CHENG, K., NIU, Z.C., WANG, R.C., RAKOWSKI, R., BATEMAN, R. **Smart cutting tools and smart machining: development approaches, and their implementation and application perspectives**. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 30:1162-1176, 2017.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª ed. São Paulo: ABM, 1988.

CHISLOCK, M.F., DOSTER, E., ZITOMER, R.A., WILSON, A.E. **Eutrophication: Causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems**. Nature Education Knowledge, 4(4):10, 2013.

CONRADIE, P.J.T., OOSTHUIZEN, G.A., DIMITROV, D. **On the effect of regrinding cutting tools for high performance milling of titanium alloys**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90:2283-2292, 2017.

COSTA, L.G. **Benchmarking da sustentabilidade: Um método para diagnóstico de práticas e performances aplicado ao gerenciamento do final do ciclo de vida**

**de produtos elétricos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

COUTINHO, L.S., DE SOUZA JUNIOR, J.J.F., FRANCISCO, M.D.O.V., GUSMÃO, T.P.D., DE FREITAS CABRAL, R. **Avaliação da microestrutura e da microdureza do ferro fundido cinzento.** Cadernos UniFOA, 10(28):17-23, 2015.

CUNHA, D.F., RESENDE, A.A. **Medição e análise de ruídos em oficina mecânica de pequeno porte para processos de usinagem.** XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Bento Gonçalves, RS, 2012.

CURRAN, M.A. **Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability.** Current Opinion in Chemical Engineering, 2(3):273-277, 2013.

DA SILVA, H.G., FERREIRA, J.C., KELM, T., IVANISKI, T.M. **Life cycle assessment of the casting process with the addition of niobium from scrap.** SN Applied Sciences, 5(12):325, 2023.

DA SILVA, H.G. **Benchmarking da produção mais limpa em empresa de fundição em moldes de areia.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

DA SILVA, H.G., FERREIRA, J.C.E., KUMAR, V., GARZA-REYES, J.A. **Benchmarking of cleaner production in sand mould casting companies.** Management of Environmental Quality: An International Journal. Emerald Publishing Limited, 2020.

DA SILVA, E. **Influência do espaçamento interlamelar da perlita nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1080.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2022.

DA SILVA, H.G., FERREIRA, J.C.E., KUMAR, A., GARZA, R. **Benchmarking of cleaner production in sand mould casting companies.** Management of Environmental Quality: An International Journal, 31(5):1407-1435, 2020.

DA SILVA, J.S. **Uma proposta de plano de gerenciamento de resíduos sólidos: um estudo de caso para micro e pequenas empresas do setor metal-mecânico.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

DA SILVA, R.C.S.C. **Dissolução de ferro-nióbio em ferro fundido.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004

DALQUIST, S., GUTOWSKI, T. **Life cycle analysis of conventional manufacturing techniques: Sand casting.** Em: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 47136, pp. 631-641), 2004.



DARMAWAN, M.A., PUTRA, M.P.I.F. AND WIGUNA, B. **Value chain analysis for green productivity improvement in the natural rubber supply chain: a case study**. Journal of Cleaner Production, 85:201-211, 2014.

DE MELLO JUNIOR, P.R.M. **O ruído industrial e sua regulamentação nacional e internacional**. Encontro nacional de engenharia de produção (ENESEP), Rio de Janeiro, RJ, 1998.

DE OLIVEIRA, C.G. **Desenvolvimento e caracterização de liga de ferro fundido branco alto cromo com adição de nióbio para uso em mineração**. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, MG, 2015.

DE OLIVEIRA, I. **Avaliação do comportamento de desgaste do ferro fundido cinzento FC25 com adição de antimônio**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, SC, 2017.

DE SOUSA, E.A. **O aquecimento global e a mudança do paradigma geopolítico atual**. Coordenadores: Saraiva, L., Vieira, R., Correa, J. Em: Estudos Estratégicos das Crises dos Conflitos Armados. Coleção "ARES", 29. 2019. Parte 1: 9-33. Lisboa, Portugal. Instituto Universitário Militar. Disponível em: [https://www.ium.pt/files/publicacoes/Ares/29/Colecao\\_ARES\\_29\\_Estudios\\_Estrategicos\\_Crises\\_Conflitos\\_Armados.pdf#page=19](https://www.ium.pt/files/publicacoes/Ares/29/Colecao_ARES_29_Estudios_Estrategicos_Crises_Conflitos_Armados.pdf#page=19). Acesso em 12 dezembro 2023.

DE SOUSA, J.A.G., MACHADO, Á.R., DA SILVA, R.B., GUESSER, W.L. **Study of the variability of the machinability along the cross section of ductile iron produced by continuous casting**. Procedia Manufacturing, 10:307-318, 2017.

DE SOUZA, R.Z. **Avaliação de parâmetros de sustentabilidade de processos de usinagem**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2016.

DE SOUZA, R.Z., HASSUI, A., LIMA, F., DORNFELD, D.A. **Environmental impacts-based milling process planning using a life cycle assessment tool**. Journal of Cleaner Production, 206:349-355, 2019.

DEDAVID, B.A., GOMES, C.I., MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdiPUCRS, Porto Alegre, RS, 2007.

DEIF, A.M. **A system model for green manufacturing**. Journal of Cleaner Production, 19(14):1553-1559, 2011

DELORENZO, R., KIMBROUGH, D.R. **Solving the mystery of the fading fingerprints with London dispersion forces**. Journal of Chemical Education, 75(10):1300, 1998.

DENG, B., LUONG, D.X., WANG, Z., KITTRELL, C., MCHUGH, E.A., TOUR, J.M., **Urban mining by flash Joule heating**. Nature Communications, 12(1):5794, 2021.

DIN EN 1561/1997. **Norma Europeia de coeficiente de dilatação térmica do ferro fundido cinzento**, 1997.

DINIZ, A.E., FERRER, J.A.G. **A comparison between silicon nitride-based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces**. Journal of Materials Processing Technology, 206(1-3):294-304. 2008.

DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. 4ª Edição, Artliber editora, São Paulo, 2003.

DONEY, S.C., MAHOWALD, N., LIMA, I., FEELY, R.A., MACKENZIE, F.T., LAMARQUE, J.F., RASCH, P.J. **Impact of anthropogenic atmospheric nitrogen and sulfur deposition on ocean acidification and the inorganic carbon system**. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(37):14580-14585, 2007.

DORNFELD, D.A., HUTCHINS, M.J. **ME290I: Sustainable Manufacturing, Graduate Course Presentation**. University of California, Berkeley, EUA, 2013.

EMENIKE, E.C., IWUOZOR, K.O., ANIDIOBI, S.U. **Heavy metal pollution in aquaculture: sources, impacts and mitigation techniques**. Biological Trace Element Research, 1-17, 2021.

ETTRUP, K., KOUNINA, A., HANSEN, S.F., MEESTERS, J.A., VEA, E.B., LAURENT, A. **Development of comparative toxicity potentials of TiO<sub>2</sub> nanoparticles for use in life cycle assessment**. Environmental science & technology, 51(7):4027-4037, 2017.

EXAME. **Revista. O custo do nióbio**, 2023.

EZUGWU, E.O., **Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(12-13):1353–1367, 2005.

FANG, C., SONG, K., PAERL, H.W., JACINTHE, P.A., WEN, Z., LIU, G., TAO, H., XU, X., KUTSER, T., WANG, Z., DUAN, H. **Global divergent trends of algal blooms detected by satellite during 1982–2018**. Global Change Biology, 28(7):2327-2340, 2022.

FARIAS, L.N., ROCHA, J.H.A., CALDAS, L.R., TOLEDO FILHO, R.D. **Avaliação dos impactos ambientais de concretos e argamassas contendo materiais cimentícios suplementares (MCS) e agregados reciclados (AR) por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV): Uma revisão da literatura**. Anais IV EURO ELECS - Encontro Latino Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 290-303, 2021.

FRANZEN, D., WEISS, K., GUNDLACH, J., BÜHRIG-POLACZEK, A. **Application of surface layer inoculation processes to solid solution-strengthened ductile cast iron**. International Journal of Metalcasting, 14:1041-1051, 2020.

FRÁS, E., GÓRNY, M. **Inoculation effects of cast iron.** Archives of Foundry Engineering, vol. 12, 2012.

FROES, F., BOYER, R. **Additive manufacturing for the aerospace industry.** Elsevier, 2019.

GABALDO, S., DINIZ, A.E., ANDRADE, C.L.F., GUESSER, W.L. **Performance of carbide and ceramic tools in the milling of compact graphite iron-CGI.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 32:511-517, 2010.

GABI, J.B. **Handbook on Life Cycle Assessment (LCA): Using the GaBi Education Software Package.** PE International, Leinfelden-Echterdingen, Germany, 2010.

GARCIA, F.L. **Proposta de implantação de manutenção preventiva em um centro de usinagem vertical: Um estudo de caso.** Revista Tecnologia e Tendências, 9(2):88-115. 2014.

GARCIA, M., MARTINEZ, P., LOPEZ, J., FERNANDEZ, R. **Application of the RECIPE method in assessing the environmental impact of food packaging: A case study.** Resources, Conservation & Recycling. 2023.

GHISELLINI, P., NCUBE, A., CASAZZA, M., PASSARO, R. **Toward circular and socially just urban mining in global societies and cities: Present state and future perspectives.** Frontiers in Sustainable Cities, 4:930061, 2022.

GOINDI, G.S., SARKAR, P. **Dry machining: a step towards sustainable machining—challenges and future directions.** Journal of Cleaner Production, 165:1557-1571, 2017.

GONG, X., XIAO, X., LI, Q., ZHAO, J., FAN, Z. **Rapid recycling of waste salt core materials in foundry industry using fractional crystallization.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 124:447-454, 2023.

GUESSER, W.L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos.** São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

GUINÉE, J., HUPPES, G., HEIJUNGS, R., ZAMAGNI, A. **Lyfe cycle: Past, present and future.** Leiden University, 2011.

GUINÉE, J.B., GORRÉE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., DE KONING, A., OERS, L.V., WEGENER SLEESWIJK, A., SUH, S., UDO DE HAES, H.A., DE Bruijn, H. **Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standard.** Centre of Environmental Science—Leiden University (CML), 2001.

GUINÉE, J.B., LINDEIJER, E. **Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards (Vol. 7).** Springer Science & Business Media. 2002.

GUMUS, S., EGILMEZ, G., KUCUKVAR, M., SHIN PARK, Y. **Integrating expert weighting and multi-criteria decision making into eco-efficiency analysis: the case of US manufacturing.** Journal of the Operational Research Society, 67(4):616-628, 2016.

GUZIK, E., KOPYCINSKI, D., ZIÓLKO, A., SZCZESNY, A. **The method of inoculation of high-quality grey cast iron intended for massive castings for bottom and distance plates as well counterweights manufactured as vertical castings.** Archives of Metallurgy and Materials, 68, 2023.

HAANAES, K., BALAGOPAL, B., KONG, M.T., VELKEN, I., ARTHUR, D., HOPKINS, M.S., KRUSCHWITZ, N. **New Sustainability Study: The 'Embracers' Seize Advantage.** MIT Sloan Management Review, Spring 2011.

HAMI, N., MUHAMAD, M.R., EBRAHIM, Z. **The impact of sustainable manufacturing practices and innovation performance on economic sustainability.** Procedia CIRP, 26:190-195, 2015.

HARVEY, A.L., BRADLEY, K.N., COCHRAN, S.A., ROWAN, E.G., PRATT, J.A., QUILLFELDT, J.A., JERUSALINSKY, D.A. **What can toxins tell us for drug discovery?** Toxicol, 36(11):1635-1640, 1998.

HELMERS, E., DIETZ, J., WEISS, M. **Sensitivity analysis in the life-cycle assessment of electric vs. combustion engine cars under approximate real-world conditions.** Sustainability, 12(3):1241. 2020.

HERTZBERG, M., SIDDON, A., SCHREUDER, H. **Role of greenhouse gases in climate change.** Energy & Environment, 28(4):530-539, 2017.

HOCHSTETLER, R.L. **Recursos naturais e o mercado: três ensaios.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HOENOW, N.C., KIRK, M. **Does competitive scarcity affect the speed of resource extraction? A common-pool resource lab-in-the-field experiment on land use in northern Namibia.** World Development, 147:105623. 2021.

HOSSAIN, M. POON, C., LO, I., CHENG, J. **Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA.** Resources, Conservation and Recycling. 2016.

HOSSAIN, M.U., POON, C.S., LO, I.M., CHENG, J.C. **Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA.** Resources, Conservation and Recycling, 109:67-77, 2016.

HOUGHTON, J. **The science of global warming.** Interdisciplinary Science Reviews, 26(4):247-257, 2001.

HUANG, B., LEI, C., WEI, C., ZENG, G. **Chlorinated volatile organic compounds (Cl-VOCs) in environment—sources, potential human health impacts, and current remediation technologies**. Environment International, 71:118-138, 2014

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 7a ed., dez. 2012. Disponível em: Acesso em 23 maio 2020.

IMAGE PRÓ-PLUS, Startup Guide. Disponível em: <https://help.mediacy.com/Image-Pro/Documentation/7/IPPStartUp.pdf>. Acesso em 10 de dezembro de 2023.

INFOMET. **Aços e ligas, aços e ferros fundidos, ferros fundidos brancos**. Disponível em: [www.infomet.com.br](http://www.infomet.com.br). Acesso em 18 de janeiro de 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Product Sustainability Index: A metrics-based framework to evaluate the total life cycle international energy agency**. Key World Energy Statistics. OECD/IEA Publishing, 2015.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION (ISO) ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework, Genebra, Suíça, 2006.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION (ISO) ISO 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment: Requirements and Guidelines. Genebra, Suíça, 2006.

JACQUEMIN, L., PONTALIER, P.Y., SABLAYROLLES, C. **Life cycle assessment (LCA) applied to the process industry: a review**. The International Journal of Life Cycle Assessment, 17:1028-1041, 2012.

JEZIERSKI, J., BARTOCHA, D. **Properties of cast iron modifying with use of new inoculants**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 22(1):25-28, 2007.

JOHNSON, D. MULLER, A. WEI, C. **Towards a comprehensive framework for sustainable development: integrating economic, social, and environmental indicators**. Journal of Sustainable Development, 2023.

KAZAKOVA, E., LEE, J. **Sustainable manufacturing for a circular economy**. Sustainability, 14(24):17010, 2022.

KHAN, A. LECLERC, S. YAMAMOTO, K. **Innovative approaches to sustainable development: Bridging the gap between theory and practice**. Sustainability Policy, 2023.

KJØDE, S.G., VAN DER VELDEN, M., MOTEVALLIAN, M. **Sustainability concepts in Nordic business research: a critical perspective**. Sustainability, 13(9):5160, 2021.

KURDVE, M., SHAHBAZI, S., WENDIN, M., BENGTSSON, C., WIKTORSSON, M. **Waste flow mapping to improve sustainability of waste management: A case study approach.** Journal of Cleaner Production, 98:304-315, 2015.

LEBLANC, R. **An introduction to metal recycling.** Disponível em <https://www.liveabout.com/an-introduction-to-metal-recycling-4057469>. Acesso em 16 abril 2023.

LEE, H., KIM, S., CHOI, E. **Enhancing sustainability assessment in the textile industry using the RECIPE method.** Sustainability, 2023.

LEKAKH, S.N., RICHARDS, V.L. **The effect of aging on material properties determines the optimal machining time.** Disponível em: <https://www.moderncasting.com/articles/2014/01/01/cast-iron-machinability>. Acesso em 23 de novembro de 2023.

LÉLÉ, S.M. **Sustainable development: A critical review.** World Development, 19(6):607-621, 1991.

LIAN, M., WANG, J., SUN, L., XU, Z., TANG, J., YAN, J., ZENG, X. **Profiles and potential health risks of heavy metals in soil and crops from the watershed of Xi River in Northeast China.** Ecotoxicology and Environmental Safety, 169:442-448, 2019.

LINSER, S., LIER, M. **The contribution of sustainable development goals and forest-related indicators to national bioeconomy progress monitoring.** Sustainability, 12(7):2898, 2020.

LIU, Y., SYBERFELDT, A. **Linking simulation-based LCA to manufacturing decision support: An iron foundry case study.** Em: Advances in Manufacturing Technology XXXV: Proceedings of the 19th International Conference on Manufacturing Research, Incorporating the 36th National Conference on Manufacturing Research, 6–8 September 2022, University of Derby, Derby, UK (Vol. 25, p. 325). IOS Press, 2022.

LORENZETTI, D.H., CRUZ, R.M., RICIOLI, S. **Estratégia empresarial e sustentabilidade: Um modelo integrador.** Revista da Pós-graduação: Administração, 2(3):33-57, 2008.

LUNARDI, M.M., MOORE, S., ALVAREZ-GAITAN, J.P., YAN, C., HAO, X., CORKISH, R. **A comparative life cycle assessment of chalcogenide/Si tandem solar modules.** Energy, 145:700-709. 2018.

LUZ, L.M. **Integração da avaliação do ciclo de vida ao processo de desenvolvimento de produto: uma proposta metodológica.** Tese de Doutorado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2017.

MACHADO, A.R., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T., DA SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** Edgard Blucher, São Paulo, 2011.

MALAYATH, G., MOTE, R.G. **A review of cutting tools for ultra-precision machining**. *Machining Science and Technology*, 26(6):923-976, 2022.

MANCINI, L., BENINI, L., SALA, S. **Resource footprint of Europe: Complementarity of material flow analysis and life cycle assessment for policy support**. *Environmental Science & Policy*, 54:367-376, 2015.

MARQUES, D.C. **Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe-Cr-Ni**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007.

MARTIN, D.R. **Efeitos dos inoculantes à base de FeSi-Sr e FeSiBa na usinabilidade do ferro fundido cinzento GG-25**. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, PR, 2015.

MATTHEWS, H.S., HENDRICKSON, C.T., MATTHEWS, D.H. **Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter**. 2015.

MATTHEWS, H.S., HENDRICKSON, C.T., MATTHEWS, D.H. **Life cycle assessment: quantitative approaches for decisions that matter**. Retrieved June, 1:2016, 2015.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6a ed., 2022. Disponível em <https://www.gov.br/mcti/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes-mcti/estimativas-anuais-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-no-brasil/estimativas-anuais-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-no-brasil.pdf>. Acesso em 12 novembro 2023.

**MEDIUM**. Disponível em: <https://medium.com/@rastros.eco.br/sustentando-a-greve-fd19af9edf93>. Acesso em 19 de fevereiro de 2024.

MENDES, N.C., BUENO, C., OMETTO, A.R. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos**. *Production*, 26:160-175, 2015.

MITTERPACH, J., HRONCOVÁ, E., LADOMERSKÝ, J., BALCO, K. **Environmental evaluation of grey cast iron via life cycle assessment**. *Journal of Cleaner Production*, 148:324-335, 2017.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Estudo de reciclagem de metais no país (2009)**. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/36108/450079/P57\\_RT83\\_Reciclagem\\_de\\_Metals\\_no\\_Paxs.pdf/2c11b09c-fa95-cf3d-2699-5a2efc59cb5b?version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/36108/450079/P57_RT83_Reciclagem_de_Metals_no_Paxs.pdf/2c11b09c-fa95-cf3d-2699-5a2efc59cb5b?version=1.0). Acesso em 26 de agosto de 2020.

MOHANAKUMAR, K. **Stratosphere troposphere interactions: An introduction**. Springer Science & Business Media, 2008.

MONKS, P.S., RAVISHANKARA, A.R., VON SCHNEIDEMESSER, E., SOMMARIVA, R., Opinion: **Papers that shaped tropospheric chemistry.** Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 1-63, 2021.

MORF, L.S., GLOOR, R., HAAG, O., HAUPT, M., SKUTAN, S., DI LORENZO, F., BÖNI, D. **Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste-sources and fate in a Swiss incineration plant.** Waste Management, 33(3):634-644, 2013.

MOSCHEM, J.C., GONÇALVES, P.R. **Impacto toxicológico de metais pesados: uma análise de efeitos bioquímicos e celulares.** Health and Biosciences, 1(2):88-100, 2020.

MÜLLER, L.J., KÄTELHÖN, A., BACHMANN, M., ZIMMERMANN, A., STERNBERG, A., BARDOW, A. **A guideline for life cycle assessment of carbon capture and utilization.** Frontiers in Energy Research, 8:15, 2020.

MUNCK, L., SOUZA, R.B. **Responsabilidade social empresarial e sustentabilidade organizacional: a hierarquização de caminhos estratégicos para o desenvolvimento sustentável.** Revista Brasileira de Estratégia, 2(2):185-202, 2009.

MUÑOZ DIAS, L.R., DINIZ, A.E. **Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force,** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 35:17-29, 2013.

NETO, F.F., PASA, M.C., DE MELLO RIBEIRO, G.H.P., VALLES, H.E.P. **Management and conservation of natural resources in the recovery of degraded areas through ethnobotany.** FLOVET-Boletim do Grupo de Pesquisa da Flora Vegetação e Etnobotânica, 1(12):e2023006-e2023006, 2023.

NETO, L.A.S., DE SOUZA, N.L.S., DE FÁTIMA ROSSATO, I., HENKES, J.A. AND KEINE, S. **Avaliação dos metodos para aplicação da análise do inventário do ciclo de vida na indústria moveleira.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 9(4):126-152, 2020.

NUNES, B.Z., MOREIRA, L.B., XU, E.G., CASTRO, Í.B. **A global snapshot of microplastic contamination in sediments and biota of marine protected areas.** Science of The Total Environment, 865:161293, 2023.

OLATUNJI, A.S., KOLAWOLE, T.O., OLORUNTOLA, M., GÜNTER, C. **Evaluation of pollution of soils and particulate matter around metal recycling factories in southwestern Nigeria.** Journal of Health and Pollution, 8(17):20-30, 2018.

**OPENLCA**, 2020. Disponível em: <https://www.enciclo.com.br/openlca/>. Acesso em 24 de setembro de 2023.



OPERATRIX, **Fresadoras e máquinas.** Disponível em: <https://www.operatrix.com.br/lista/maquinas-operatrizes-3/fresadoras-10>. Acesso em 10 de novembro de 2023.

OSHIRO, P.B. **Estudos sobre a utilização do pentacloreto de nióbio na síntese de derivados cumarínicos com estrutura doador-p-aceptor com potencial aplicação como corantes sensibilizadores em dispositivos fotoeletroquímicos de Gratzel**, 2019.

PACHAURI, R.K., ALLEN, M.R., BARROS, V.R., BROOME, J., CRAMER, W., CHRIST, R., CHURCH, J.A., CLARKE, L., DAHE, Q., DASGUPTA, P., DUBASH, N.K. **Climate change 2014: Synthesis report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (p. 151). IPCC, 2014.

PAN, S., ZENG, F., SU, N., XIAN, Z. **The effect of niobium addition on the microstructure and properties of cast iron used in cylinder head.** Journal of Materials Research and Technology, 9(2):1509-1518, 2020.

PENGWEI, H.E., YASHAN, P.E.N.G. **Urban mineral development and utilization: prospects, influencing factors and management policies.** China Mining Magazine, 32(10):1-10, 2023.

PEREIRA, F.S. **Torneamento em alta velocidade do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramenta de nitreto de silício**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

PIESKE, A., CHAVES, F., MONTENEGRO, L., REIMER, J.F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade.** Joinville: Sociedade Educacional Tupy, 1980.

PIGOSSO, D.C., ZANETTE, E.T., GUELERE FILHO, A., OMETTO, A.R., ROZENFELD, H. **Ecodesign methods focused on remanufacturing.** Journal of Cleaner Production, 18(1):21-31, 2010.

POTTING, J., FINNVEDEN, G. **LCA Compendium—The Complete World of Life Cycle Assessment** (book series) Series editors: Walter Klöpffer and Mary Ann Curran: Life Cycle Impact Assessment Editors: Michael Z. Hauschild and Mark AJ Huijbregts, 2015.

PRIJANOVIC, M.T., MRVAR, P., BURJA, J., DONIK, C., PETRIC, M. **Study on dissolution of ba-containing inoculant in ductile cast iron melt and nucleation of graphite.** International Journal of Metalcasting, 1-11, 2023.

PRINTES, C. **Um mal a ser combatido: a obsolescência programada.** IDEC – Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor, 2012. Disponível em: <https://idec.org.br/em-acao/artigo/um-mal-a-ser-combatido-a-obsolescencia-programada>. Acesso em 23 de junho de 2020.

RADZIKOWSKA, J.M. **Effect of specimen preparation on evaluation of cast iron microstructures.** Materials Characterization, 54(4-5):287-304, 2005.

RAMOS, A.R. **Benchmarking da produção mais limpa para a análise de empresas de manufatura.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

RAOUFI, K., WISTHOFF, A.K., DUPONT, B.L., HAAPALA, K.R. **A questionnaire-based methodology to assist non-experts in selecting sustainable engineering analysis methods and software tools.** Journal of Cleaner Production, 229:528-541, 2019.

REBITZER, G., EKVALL, T., FRISCHKNECHT, R., HUNKELER, D., NORRIS, G., RYDBERG, T., SCHMIDT, W.P., SUH, S., WEIDEMA, B.P., PENNINGTON, D.W. **Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.** Environment International, 30(5):701-720, 2004.

RENOU, S., THOMAS, J.S., Aoustin, E., PONS, M.N. **Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA.** Journal of Cleaner Production, 16(10):1098-1105, 2008.

REPORT RECIPE. **A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization.** National Institute For Public Health and the Environment. 2016.

RIPOSAN, I., STEFAN, E., STAN, S., PANA, N.R., CHISAMERa, M. **Effects of inoculation on structure characteristics of high silicon ductile cast irons in thin wall castings.** Metals, 10(8):1091, 2020.

RITZ, B., HOFFMANN, B., PETERS, A. **The effects of fine dust, ozone, and nitrogen dioxide on health.** Deutsches Ärzteblatt International, 116(51-52):881, 2019.

RMA Representação, **Equipamentos de separação e classificação.** Disponível em: <https://rmarepresentacao.com.br/separacao-classificacao>. Acesso em 10 de maio de 2024.

ROBINSON, S.L. **An environmental and economic trade-off analysis of manufacturing process chains to inform decision making for sustainability.** Tese de doutorado, University of California, Berkeley, EUA, 2013.

RODRIGUEZ, T., WEI, Z., JOHNSON, E. **Measuring progress towards sustainability: comparative analysis of national policies and practices.** Environmental Science & Policy, 2023.

ROMEIRO, A.R. **Desenvolvimento sustentável: Uma perspectiva econômico-ecológica.** Estudos Avançados, 26:65-92, 2012.

ROY, P., MIAH, M.D., ZAFAR, M.T. **Environmental impacts of bicycle production in Bangladesh: a cradle-to-grave life cycle assessment approach**. SN Applied Sciences, 1:1-16, 2019.

SATERNUS, M., SOCHA, L. **Modern Trends in Foundry**. Metals, 13(7):1236, 2023.

SCHLEMPER, P.F., BARBOSA, J.D.S.B., NASCIMENTO, M.F. **Gestão de marcas verdes no setor hoteleiro: Management of green brands in hotel sector**. MIX Sustentável, 1(1):76-88, 2015.

SCHLEZAK, S.L., STYER, J.E. **Inclusive urban mining: An opportunity for engineering education**. Mining, 3(2):284-303, 2023.

SCHLICKMANN, M.N. **Método para avaliação da obsolescência de um equipamento do processo de manufatura com base no tripé da sustentabilidade**. Qualificação para Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SERAFINI, S., SOARES, J.G., PEROSA, C.F., PICOLI, F., SEGAT, J.C., DA SILVA, A.S., BARETTA, D. **Eprinomectin antiparasitic affects survival, reproduction and behavior of Folsomia candida biomarker, and its toxicity depends on the type of soil**. Environmental Toxicology and Pharmacology, 72:103262, 2019.

SHAHBAZPOUR, M., SEIDEL, R.H.A. **Using sustainability for competitive advantage**. Em: 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Auckland, Nova Zelândia, 2006.

SIGNORELLI, R., BABERGE, I.M., DO NASCIMENTO, W.E., DE ASSIS, C.L., GALLEGO, J. **Avaliação de desempenho da geometria de ferramentas de corte na usinagem interna de implantes odontológicos de titânio grau 4**. Em: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT), Águas de Lindóia, SP, 2022.

SLAPER, T.F., HALL, T.J. **The triple bottom line: What is it and how does it work**. Indiana business review, 86(1):4-8, 2011.

SMITH, J., GARCIA, M., WEI, L. **Integrated assessment of sustainable development: balancing economic, social, and environmental dimensions**. Sustainability Science, 2023.

SPINAK, E. **Reprodução e replicação na pesquisa científica**. Disponível em <https://blog.scielo.org/blog/2023/05/19/reproducao-e-replicacao-na-pesquisa-cientifica-parte-1/>. Acesso em 24 de abril de 2024.

SPINOLA, T.S., SPINELLI, J.E. **Transient directional solidification of cast iron: microstructure formation, columnar to equiaxed transition and hardness**. Materials Research, 19:795-801, 2016.

SUDO, T.T., BRAGHINI JUNIOR, A., COELHO, R.T. **O desgaste de ferramentas na usinagem de ferro fundido cinzento a alta velocidade.** O Mundo da Usinagem. Encarte Científico, 5:27-31, 2001.

TAYLOR, E., RODRIGUEZ, D., ZHANG, W. **Innovative approaches to information quantification in life cycle inventory analysis.** Resources, Conservation and Recycling, 92:81-95, 2023.

TOMAZZOLI, C., SCANNAPIECO, S., CRISTANI, M. **Internet of things and artificial intelligence enable energy efficiency.** Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 14(5):4933-4954, 2023.

TRAVERSO, M., FINKBEINER, M., JØRGENSEN, A., SCHNEIDER, L. **Life cycle sustainability dashboard.** Journal of Industrial Ecology, 16(5):680-688, 2012.

TRENT, E., WRIGHT, P. **Metal cutting.** Butterworth/Heinemann, Oxford, 2000.

TURK, J., COTIC, Z., MLADENOVIC, A., ŠAJNA, A. **Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA.** Waste Management, 45:194-205, 2015.

VALPASSOS, J.M., RAMALHO, A.M., BOBROVNITCHII, G.S., MONTEIRO, S.N. **Sinterização de pastilhas de nitreto cúbico de boro utilizando como ligantes compostos de titânio.** Matéria (Rio de Janeiro), 12:438-445, 2007.

VAN LUTTERVELT, C.A., CHILDS, T.H.C., JAWAHIR, I.S., KLOCKE, F., VENUVINOD, P.K., ALTINTAS, Y., ARMAREGO, E., DORNFELD, D., GRABEC, I., LEOPOLD, J., LINDSTROM, B. **Present situation and future trends in modelling of machining operations progress report of the CIRP Working Group 'Modelling of Machining Operations'.** CIRP Annals, 47(2):587-626, 1998.

VELEVA, V., ELLENBECKER, M. **Indicators of sustainable production: framework and methodology.** Journal of Cleaner Production, 9(6):519-549, 2001.

VITOR & BUONO, **Cabeçote de fresar.** Disponível em <https://vitorbuono.com.br/acessorios/cabecote-de-fresar/>. Acesso em 12 de fevereiro de 2024.

VUKELIC, D. SIMUNOVIC, K. SIMUNOVIC, G. TOMISLAV, S. ZELJKO, K. BUDAK, A., WANG, A. LOPEZ, C. JOHNSON, E. **Assessment of natural resource depletion in foundry operations: Case studies and solutions.** 2019.

WANG, H., LIU, Q., ZHANG, G., YANG, J. **Assessing the carbon footprint of transportation systems: a recipe-based approach.** Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2023.

WEINGAERTNER, W.L., SCHROETER, R.B. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte I.** Tradução do livro

“Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen” de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.

WORRELL, E. **The next frontier to realize industrial energy efficiency**. Em: Linköping Electronic Conference Proceedings (Vol. 7, No. 057, pp. 1-13). Linköping University Electronic Press, 2011.

XIONG, Y., DU, K. **Source-resolved attribution of ground-level ozone formation potential from VOC emissions in Metropolitan Vancouver, BC**. Science of the Total Environment, 721:137698, 2020.

YANG, X.E., WU, X., HAO, H.L., HE, Z.L. **Mechanisms and assessment of water eutrophication**. Journal of Zhejiang University Science B, 9:197-209, 2008.

YAY, A.S.E. **Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: A case study of Sakarya**. Journal of Cleaner Production, 94:284-293, 2015.

YECKLEY, R. **Ceramic grade design. Kennametal comprehensive application engineering guide**, vol 12, 2005.

YILMAZ, O., ANCTIL, A., KARANFIL, T. **LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting**. Journal of Cleaner Production, 105:337-347, 2015.

YOOL, A., POPOVA, E.E., COWARD, A.C., BERNIE, D., ANDERSON, T.R. **Climate change and ocean acidification impacts on lower trophic levels and the export of organic carbon to the deep ocean**. Biogeosciences, 10(9):5831-5854. 2013.

ZANUTO, R.S., **Avaliação de parâmetros de sustentabilidade de processos de usinagem**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2016.

ZANUTO, R.S., HASSUI, A., LIMA, F., DORNFELD, D.A. **Environmental impacts-based milling process planning using a life cycle assessment tool**. Journal of Cleaner Production, 206:349-355, 2019.

ZHANG, G., WANG, Y., MENG, X., ZHANG, D., DING, N., REN, Z., GAO, W., SUN, Z. **Life cycle assessment on the vanadium production process: A multi-objective assessment under environmental and economic perspectives**. Resources, Conservation and Recycling, 192:106926, 2023.

ZHANG, Y., LUO, X., BUIS, J.J., SUTHERLAND, J.W. **LCA-oriented semantic representation for the product life cycle**. Journal of Cleaner Production, 86:146-162, 2015.

ZHELEZNY, V.P., KHANCHYCH, K.Y., MOTOVOY, I.V., NIKULINA, A.S. **On the nonmonotonous behavior of the thermal properties of fullerene C60/o-xylene solutions**. Journal of Molecular Liquids, 338:116629, 2021.

ZHOU, J., CHANG, V.W.C., FANE, A.G. **Environmental life cycle assessment of reverse osmosis desalination: the influence of different life cycle impact assessment methods on the characterization results.** *Desalination*, 283:227-236, 2011.